

**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

Consumo hídrico do pinhão-mansô (*Jatropha curcas* L.) irrigado e sem irrigação na fase de formação

Bruno Patias Lena

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas

**Piracicaba
2013**

Bruno Patias Lena
Engenheiro Agrônomo

**Consumo hídrico do pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.) irrigado e sem irrigação na fase
de formação**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **MARCOS VINÍCIUS FOLEGATTI**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Engenharia
de Sistemas Agrícolas

**Piracicaba
2013**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - ESALQ/USP**

Lena, Bruno Patias

Consumo hídrico do pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.) irrigado e sem irrigação na fase de formação / Bruno Patias Lena. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2013.
62 p: il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2013.

1. Lisímetro 2. Irrigação 3. Evapotranspiração 4. Coeficiente de cultivo I. Título

CDD 633.85
L563c

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

Aos meus pais Marcos e Rozania;

A minha irmã Clarissa;

A todos os amigos e familiares;

Àqueles que trabalham em prol da ciência no Brasil.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Professor Marcos Vinícius Folegatti, que me recebeu de braços abertos. Gostaria de agradecer por ter acreditado em mim e no meu trabalho. Obrigado pelo incentivo, pelas orientações e pelos ensinamentos transmitidos. Acredito que sem eles esse trabalho não teria sido concluído. Agradeço pela oportunidade de ser orientado por esse grande profissional que sempre vou me orgulhar em seguir seus modelos de ensino, amizade e convivência na minha vida profissional.

Agradeço aos professores do Departamento de Engenharia de Biosistemas da ESALQ/USP, pois muito desse trabalho deveu-se a vocês.

Às secretárias Ângela, Davilmar e Bia do Departamento de Engenharia de Biosistemas da ESALQ/USP pela paciência e compreensão quando solicitada. Agradeço em especial a Bia pelos conselhos e exemplo de dedicação. Surpreendo-me diariamente com seu profissionalismo.

A todos os técnicos do Departamento de Engenharia de Biosistemas da ESALQ/USP que me ajudaram e aconselharam na tomada de decisão para o desenvolvimento desse trabalho. Em especial ao Lino e ao Afonso, pessoas que sempre procuraram me ajudar quando precisei.

À ESALQ pela oportunidade de cursar o mestrado e por toda a instalação. Acredito que essa instituição deveria ser usada como modelo no Brasil.

Agradeço a FAPESP e a CAPES pela concessão das bolsas de mestrado e, em especial, à FAPESP pelo financiamento do projeto de pesquisa.

Acredito que a amizade é fundamental na construção de um trabalho, pois ela transmite segurança, incentivo, conselhos e te mostra os pontos positivos e negativos de suas atitudes. Assim, gostaria de agradecer a vocês, meus amigos João Paulo, Danilton, Adriano, Cícero, Gilmar, Antônio, Paulinha e a todos os estudantes de Pós-Graduação do Programa de Engenharia de Sistemas Agrícolas. Em especial ao João Paulo e ao Danilton, que sempre abriram mão de suas obrigações para me ajudar a realizar meu trabalho.

Gostaria de agradecer de coração aos meus pais, Marcos e Rozania, que foram fundamentais na construção da pessoa que sou hoje em dia. Se não fosse por vocês, provavelmente não estaria onde estou. Se não fosse por vocês, acredito que não seria uma

pessoa feliz. Se não fosse por vocês, não saberia o que é amar e respeitar ao próximo. Me enche de orgulho saber que posso contar com pais que sempre me incentivaram, me apoiaram, brigaram comigo, mas sempre me aconselharam. Eu amo vocês.

À minha irmã, Cissa, que sempre esteve eu meu lado, acreditou em mim, que sempre me amou e que sempre vou amar. Sei que posso contar com você para sempre na minha vida. E, por fim, a todos meus familiares.

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| RESUMO..... | 9 |
| ABSTRACT..... | 11 |
| LISTA DE FIGURAS..... | 13 |
| LISTA DE TABELAS..... | 16 |
| 1 INTRODUÇÃO..... | 17 |
| 2 DESENVOLVIMENTO | 19 |
| 2.1 Revisão bibliográfica..... | 19 |
| 2.1.1 A planta..... | 19 |
| 2.1.2 Evapotranspiração..... | 20 |
| 2.1.3 Evaporação e Transpiração | 22 |
| 2.1.4 Coeficiente de cultivo simples e dual | 23 |
| 2.2 Material e métodos | 24 |
| 2.2.1 Caracterização da área experimental..... | 24 |
| 2.2.2 Manejo da área..... | 26 |
| 2.2.3 Lisímetros de pesagem..... | 28 |
| 2.2.4 Sistema de aquisição de dados | 29 |
| 2.2.5 Avaliação do crescimento das plantas | 31 |
| 2.2.6 Determinação da evapotranspiração e coeficiente de cultivo simples..... | 31 |
| 2.2.7 Determinação da evaporação, transpiração e coeficiente de cultivo dual..... | 32 |
| 2.2.8 Teste dos microlisímetros | 35 |
| 2.3 Resultados e discussão | 37 |
| 2.3.1 Armazenamento de água no solo, evapotranspiração e coeficiente de cultivo simples | 37 |
| 2.3.1.1 Crescimento das plantas | 37 |
| 2.3.1.2 Avaliação do desempenho dos lisímetros | 38 |
| 2.3.1.3 Armazenamento de água no solo..... | 41 |
| 2.3.1.4 Evapotranspiração e coeficiente de cultivo simples..... | 43 |
| 2.3.1.5 Síntese dos valores de evapotranspiração e coeficiente de cultivo simples | 47 |
| 2.3.2 Evaporação, transpiração e coeficiente de cultivo dual | 48 |
| 2.3.2.1 Análise do microlisímetro utilizado | 48 |
| 2.3.2.2 Evaporação, transpiração e coeficiente de cultivo dual | 49 |
| 2.3.2.3 Síntese dos valores de evaporação, transpiração e coeficiente de cultivo dual.... | 55 |
| 3 CONCLUSÕES..... | 57 |

REFERÊNCIAS 59

RESUMO

Consumo hídrico do pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.) irrigado e sem irrigação na fase de formação

O conhecimento da demanda hídrica de uma cultura é fundamental para o planejamento da implantação de novas áreas, bem como para a análise da viabilidade econômica de uma cultura em determinada região. A utilização de culturas para fontes de matéria prima alternativa vem sendo altamente estudada nos últimos anos. Dentre muitas, vem se destacando no cenário nacional e mundial a cultura do pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.) para a produção de biodiesel. O consumo de água por parte do pinhão-manso é pouco conhecida, necessitando ser estudada a fim de aprofundar os conhecimentos sobre a cultura e fornecer parâmetros confiáveis para a prática da irrigação. Os objetivos desse trabalho foram determinar a evapotranspiração (ET), a evaporação (E), a transpiração (T), o coeficiente de cultivo (Kc), coeficiente de evaporação (Ke) e coeficiente de cultivo basal (Kcb) do pinhão-manso na fase de formação irrigados por pivô central, gotejamento e sem irrigação na cidade de Piracicaba, SP. O experimento foi realizado na Fazenda Areão da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da USP durante o período de março de 2012 a abril de 2013. O experimento foi dividido em três tratamentos, sendo: irrigado por pivô central, gotejamento e sem irrigação. A determinação de ET foi realizada por meio lisímetros de pesagem em cada tratamento, contabilizando a variação de massa em função das entradas saídas de água no sistema. A determinação do Kc foi realizada pela razão entre ET e ETo (estimado a partir de dados coletados na estação meteorológicos automática da Fazenda Areão). Por meio de microlisímetros de pesagem, foi determinado E. De posse dos dados de E, foram determinados os valores de T pela diferença de E (determinado no microlisímetro) e ET (determinado no lisímetro). Os valores de Ke e Kcb foram determinados pela razão de E e T por ETo, respectivamente. Os valores de ET variaram, principalmente, em função do método de irrigação. Foi observado uma superioridade dos valores de ET para o tratamento irrigado por pivô central, seguido do tratamento irrigado por gotejamento e sem irrigação. As médias dos tratamentos durante o primeiro ano foram 3,17, 2,82 e 2,82 mm dia⁻¹ para os tratamentos irrigado por pivô central, irrigado por gotejamento e sem irrigação, respectivamente. Essa mesma proporção de ET entre os tratamentos irrigados foi observado nos valores de Kc. A média do período de Kc foi 0,69 e 0,63 para os tratamentos irrigados por pivô central e gotejamento. Essas maiores taxas de ET e Kc do tratamento irrigado por pivô central em relação ao tratamento irrigado por gotejamento foi devido ao método de irrigação por gotejamento ser mais eficiente na utilização de água pelas plantas em relação ao método por pivô central. Nesse método, a água é aplicada de maneira localizada as plantas, diferentemente do método por pivô central, em que a água é aplicada em toda a superfície do solo. Isso faz com que as taxas de E no método por gotejamento seja menor em relação ao pivô central, diminuindo as taxas de ET. De maneira geral, as taxas de E e Ke foram maiores em relação aos valores de T e Kcb durante o período analisado. Isso foi devido as plantas estarem com porte baixo e o solo estar quase por completo exposto as variações atmosféricas, fazendo com que as taxas de E e Ke sejam superiores as de T e Kcb. A média de E e Ke foram 1,85 mm dia⁻¹ e 1,03, respectivamente, e as médias de T e Kcb foram 0,4 mm dia⁻¹ e 0,2, respectivamente.

Palavras chave: Lisímetro; Irrigação; Evapotranspiração; Coeficiente de cultivo

ABSTRACT

Water consumption of jatropha (*Jatropha curcas* L.) irrigated and non-irrigated at formation phase

The knowledge of the water demand of a culture is essential for planning of new areas, as well as for the economic viability analysis of a culture in a specific region. The use of crops for alternative feedstock sources has been extensively studied in the last years. Among many, jatropha (*Jatropha curcas* L.) has been highlighted for biodiesel production in the national and global scenarios. Water consumption by the jatropha is little known, which requires to be studied in order to increase the knowledge and provide reliable parameters for the irrigation practice. The objectives of this study were to determine the evapotranspiration (ET), evaporation (E), transpiration (T), crop coefficient (Kc), evaporation coefficient (Ke) and basal crop coefficient (Kcb) of jatropha in the formation phase irrigated by center pivot, drip and without irrigation in Piracicaba, SP. The experiment was conducted at Areão Farm of Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” of USP during March 2012 to April 2013. The experiment included three treatments: center pivot irrigated, drip irrigated and dryland. The determination of ET was made by weighing lysimeters for each treatment, accounting the inputs and outputs of water in the lysimeter system. The determination of Kc was made by the ratio between ET and ETo (estimated from data collected at the automatic meteorological station of Areão Farm). The determination of E was made by microlysimeters and T was determined between the difference of ET and E. Ke and Kcb values were determined by the ratio of E and T by ETo, respectively. ET values varied, mainly, according to the irrigation method. It was observed superiority of ET values for the treatment irrigated by center pivot, followed by the treatment irrigated by drip and without irrigation. The average during the first year was 3.17, 2.82 and 2.82 mm day⁻¹ for the treatment irrigated by center pivot, irrigated by drip irrigated and without irrigation, respectively. The same proportion of ET from irrigated treatments was observed in the values of Kc. In the period, the average of Kc was 0.69 and 0.63 for the treatments irrigated by center pivot and irrigated by drip. These higher rates of ET and Kc of the treatment irrigated by center pivot compared to the treatment irrigated by drip was due to the method of drip irrigation is more efficient in water use by plants in relation to the method irrigated by central pivot. In this method, the water application is made in a localized way, differently in relation to the center pivot method in which water is applied all over the soil surface. This makes E rates given by drip irrigation method lower than the center pivot irrigation method, decreasing its ET averages. In general, rates of E and Ke were higher compared T and Kcb values during the period analyzed. This was explained due the short plants stature and the soil was almost completely exposed to atmospheric variations, causing rates of E and Ke exceed from T and Kcb rates. The average of Ke and E were 1.85 mm day⁻¹ and 1.03, respectively, and the average of T and Kcb were 0.4 mm day⁻¹ and 0.2, respectively.

Keywords: Lysimeter; Irrigation; Evapotranspiration; Crop coefficient

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1– Produção de mudas (a e b), transplântio (c e d) e estabelecimento das plantas no campo (e e f) | 25 |
| Figura 2 – Croqui da área experimental contendo os tratamentos e a estação meteorológica | 26 |
| Figura 3 – Representação da estrutura de alvenaria que sustenta os lisímetros e e preenchidos com solo após instalação (Flumignan, 2011) | 28 |
| Figura 4 – Esquema com os pilares de concreto (A), a estrutura de alvenaria (B), as células de carga (C) e os tubos de armazenamento de água de drenagem (D) dos lisímetros de pesagem (E) | 29 |
| Figura 5 – Balanço hídrico do sistema de lisímetro de pesagem com as entradas e saídas de água do sistema, sendo ET a evapotranspiração, E a evaporação, T a transpiração, I a irrigação, R o escoamento superficial e P a precipitação | 32 |
| Figura 6 – Componentes do microlisímetro (a), sendo o microlisímetro (A), o envoltório externo (B), o CAP para fechar o fundo (C) e o microlisímetro instalado no solo (b) | 33 |
| Figura 7 – Amostrador de solo Uhland modificado com a sequência de instalação do microlisímetro. Inserção do tubo do cilindro de PVC de 100 mm de diâmetro dentro do cilindro de corte (a); montagem da base (b), do peso de batida (c) esquema do golpe no cilindro de corte (d); cilindro cravado com o tubo de PVC preenchido com solo (e) e; remoção do cilindro (f) | 34 |
| Figura 8 – Ensaio extra do microlisímetro comparando dois diferentes diâmetros de envoltório externo | 36 |
| Figura 9 – Altura das plantas (em cm) de pinhão-manso dos tratamentos irrigados por pivô central, gotejamento e sem irrigação durante o período de dezembro 2011 a abril de 2013 | 37 |
| Figura 10 – Curso do armazenamento de água no solo a cada 10 min (kg) e evapotranspiração de referência horária (E_{To} , mm hora ⁻¹) durante cinco dias (de 27 de fevereiro a 03 de março de 2013) dos tratamentos irrigados por pivô central, gotejamento e sem irrigação | 38 |
| Figura 11 – Curso do armazenamento de água no solo horário (kg) e evapotranspiração de referência horária (E_{To} , mm hora ⁻¹) durante 24 horas dos tratamentos irrigados por pivô central, gotejamento e sem irrigação no dia 27 de fevereiro de 2013 | 39 |

- Figura 12 – Curso do armazenamento de água no solo horário (kg) durante 24 horas referenciando irrigações nos tratamentos irrigados em comparação ao sem irrigação no dia 3 de outubro de 2012 39
- Figura 13 – Evapotranspiração horária (ET, mm hora⁻¹) e evapotranspiração de referência horária (ETo mm hora⁻¹) no dia subsequente a irrigação dos tratamentos irrigados e sem irrigação no dia 4 de outubro de 2012 41
- Figura 14 – Evapotranspiração horária acumulada (ET, mm) e evapotranspiração de referência horária acumulada (ETo, mm) no dia subsequente a irrigação dos tratamentos irrigados e sem irrigação no dia 4 de outubro de 2012..... 41
- Figura 15 – Armazenamento de água no solo diário dos tratamentos irrigados por pivô central, gotejamento e sem irrigação, e precipitação (ambos em mm) durante os meses de março de 2012 a abril de 2013 em Piracicaba, SP 42
- Figura 16 – Média semanal da evapotranspiração e evapotranspiração de referência (ambos em mm dia⁻¹) dos tratamentos irrigados por pivô central, gotejamento e sem irrigação da cultura de pinhão-manso durante os meses de março de 2012 a abril de 2013 em Piracicaba, SP..... 44
- Figura 17 – Coeficiente de cultivo (Kc) dos tratamentos irrigados por gotejamento e pivô central da cultura de pinhão-manso durante os meses março de 2012 a abril de 2013 em Piracicaba, SP..... 46
- Figura 18 – Evapotranspiração (ET), evapotranspiração de referência (ETo), evaporação (E) e transpiração (T, todos em mm dia⁻¹) dos tratamentos irrigados por pivô central, (a), gotejamento (b) e sem irrigação (c) e; coeficiente de cultivo simples (Kc), coeficiente de evaporação (Ke) e coeficiente de cultivo basal (Kcb) dos tratamentos irrigados por pivô central (d) e gotejamento (e); da cultura de pinhão-manso durante o período de 10 a 14 de julho de 2012 (Série 1) 50
- Figura 19 – Evapotranspiração (ET), evapotranspiração de referência (ETo), evaporação (E) e transpiração (T, todos em mm dia⁻¹) dos tratamentos irrigados por pivô central, (a), gotejamento (b) e sem irrigação (c) e; coeficiente de cultivo simples (Kc), coeficiente de evaporação (Ke) e coeficiente de cultivo basal (Kcb) dos tratamentos irrigados por pivô central (d) e gotejamento (e); da cultura de pinhão-manso durante o período de 28 de setembro a 1º de outubro de 2012 (Série 2) 51
- Figura 20 – Evapotranspiração (ET), evapotranspiração de referência (ETo), evaporação (E) e transpiração (T, todos em mm dia⁻¹) dos tratamentos irrigados por pivô central, (a), gotejamento (b) e sem irrigação (c) e; coeficiente de cultivo simples (Kc), coeficiente

- de evaporação (K_e) e coeficiente de cultivo basal (K_{cb}) dos tratamentos irrigados por pivô central (**d**) e gotejamento (**e**); da cultura de pinhão-manso durante o período de 29 de novembro a 1º de dezembro de 2012. (Série 3) 52
- Figura 21 – Evapotranspiração (ET), evapotranspiração de referência (ET_o), evaporação (E) e transpiração (T, todos em mm dia^{-1}) dos tratamentos irrigados por pivô central, (**a**), gotejamento (**b**) e sem irrigação (**c**) e; coeficiente de cultivo simples (K_c), coeficiente de evaporação (K_e) e coeficiente de cultivo basal (K_{cb}) dos tratamentos irrigados por pivô central (**d**) e gotejamento (**e**); da cultura de pinhão-manso durante o período de 23 e 24 de janeiro de 2013 (Série 4) 53
- Figura 22 – Evapotranspiração (ET), evapotranspiração de referência (ET_o), evaporação (E) e transpiração (T, todos em mm dia^{-1}) dos tratamentos irrigados por pivô central, (**a**), gotejamento (**b**) e sem irrigação (**c**) e; coeficiente de cultivo simples (K_c), coeficiente de evaporação (K_e) e coeficiente de cultivo basal (K_{cb}) dos tratamentos irrigados por pivô central (**d**) e gotejamento (**e**); da cultura de pinhão-manso durante o período de 7 a 10 de abril de 2013 (Série 5)..... 54

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1– Evapotranspiração (ET, mm dia ⁻¹), evapotranspiração de referência (ET _o , mm dia ⁻¹), coeficiente de cultivo (K _c , adimensional) dos tratamentos irrigados por pivô central (Piv), gotejamento (Got), e sem irrigação (Seq) da cultura de pinhão-manso durante os meses de março de 2012 a abril de 2013..... | 45 |
| Tabela 2 – Comparação da evaporação utilizando microlisímetro de pesagem com dois diferentes diâmetros de envoltório externo | 48 |
| Tabela 3 – Umidade do solo com base em volume dos tratamentos irrigados por pivô central, gotejamento e sem irrigação no último dia de avaliação das Séries 1 e 2 do microlisímetro | 49 |

1 INTRODUÇÃO

Devido aos grandes volumes de combustível de origem fóssil utilizados no mundo diariamente, tornou-se evidente a necessidade de substituição desses combustíveis por alternativas renováveis e de menores impactos ambientais. Nos últimos anos, muito países vêm investindo em pesquisas com culturas bioenergéticas capazes de substituir o combustível fóssil de maneira sustentável. Dentre muitas culturas bem estabelecidas como cana-de-açúcar, soja e milho, a cultura do pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.) tem se mostrado bastante promissora nesse ramo.

Os estudos referentes a utilização da cultura do pinhão-manso para produção de combustível renovável podem ser considerado recentes. O principal motivo que impulsionou esses estudos foi devido aos custos de produção serem muito favoráveis (FRANCO & GABRIEL, 2008). Além disso, devido as plantas serem consideradas tóxicos ao consumo humano, tolerantes à baixa fertilidade, capazes de produzir em áreas com baixa precipitação anual e a utilização na recuperação de áreas degradadas, essas características vêm sendo consideradas determinantes para que a planta começasse a ser estudada. Dessa forma, a cultura do pinhão-manso apresenta-se com grande aptidão para cultivo em regiões tropicais e subtropicais de condições áridas e semi-áridas (OPENSHAW, 2000; ARRUDA et al., 2004).

As exigências edafoclimáticas teóricas do pinhão-manso permitem sua manutenção em quase todas as regiões do país, no entanto essa é uma cultura ainda pouco explorada no Brasil. Com um potencial de produção de 2000 a 3000 kg ha⁻¹ de sementes em condições áridas sem uso de irrigação, o pinhão-manso pode ser considerado uma planta oleaginosa viável para a obtenção de biodiesel. Em condições de cultivos intensivos, destacando-se uma boa disponibilidade hídrica, acredita-se que a produtividade possa atingir cerca de 5000 kg ha⁻¹ de sementes (TEWARI, 2007).

Muitos pesquisadores salientam que o pinhão-manso pode ser considerado uma cultura tolerante à seca e que produz nessas condições, porém, ainda não se sabe qual a real resposta dessa cultura quando irrigada. Se bem sucedida, a determinação do consumo hídrico do pinhão-manso pode contribuir na obtenção de informações detalhadas do potencial produtivo da cultura, além de viabilizar a utilização de água de irrigação de forma mais racional e sustentável. Levando em consideração a possibilidade de produção de óleo de pinhão-manso em larga escala (SALÉ, 2008), pode-se prever uma grande demanda por irrigação, o que pode promover um aumento na pressão pela utilização dos recursos hídricos (RAJAGOPAL, 2008).

A quantificação do consumo hídrico das plantas é importante em diversas áreas da agricultura, tais como em estudos de demanda e manejo de irrigação, zoneamento agrícola, estimativa de produção e estudos hidrológicos em geral. A evapotranspiração (ET) está diretamente relacionada a tais estudos e é definida como a quantidade de água consumida por uma determinada cultura. Segundo Allen et al. (1998), ET é a combinação da evaporação (E), que é proveniente do solo e da umidade retida no dossel foliar após eventos de chuva ou irrigação, e a transpiração (T), relacionada à planta. Por meio da razão entre ET da cultura de interesse que é cultivada sem limitação hídrica e da evapotranspiração da cultura de referência (ET_0) (ALLEN, 1986; SMITH, 1991; ALLEN et al., 1998), determina-se o coeficiente de cultivo (K_c). Este coeficiente representa a integração dos diferentes fatores que fazem com que a cultura de interesse apresente comportamento diferente da cultura de referência. Segundo Lascano & Sojka (2007), K_c é requerido nas fases de dimensionamento e manejo da irrigação.

Embora haja muita especulação sobre a quantidade real de água consumida pelas plantas de pinhão-mansão, o seu consumo hídrico ainda não é conhecido, justificando a escassez dessas informações na literatura. A maioria das informações encontradas é baseada em estimativas ou deduções teóricas. Assim, fica evidente a necessidade da determinação do consumo hídrico da cultura de pinhão-mansão, pois servirá de base para obter informações detalhadas e precisas do potencial produtivo da cultura.

Os objetivos do trabalho foram determinar a evapotranspiração e o coeficiente de cultivo simples do pinhão-mansão usando lisímetros de pesagem. Além disso, objetivou-se determinar a evaporação, transpiração e coeficiente de cultivo dual do pinhão-mansão usando microlisímetros de pesagem em Piracicaba, SP.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Revisão bibliográfica

2.1.1 A planta

O pinhão-mansão pertence à família das Euforbiáceas, denominada cientificamente *Jatropha curcas* L. e popularmente como pinhão-mansão, purgueira ou pinha de purga. Possui maior diversidade na América Central e do Sul e é possivelmente originária da América (SATURNINO et al., 2005). Encontra-se desde a orla marítima até os 1.000 m de altitude, sendo seu cultivo mais indicado em regiões que apresentam entre 500 e 800 m. Nos terrenos de encosta, áridos e expostos ao vento, desenvolve-se pouco, não ultrapassando 2 m de altura (CORTESÃO, 1956).

É um arbusto de crescimento rápido que possui raízes curtas e pouco ramificadas, caule liso, de lenho mole e medula desenvolvida, mas pouco resistente, e floema com longos canais que se estendem até as raízes. Tronco dividido desde a base, em compridos ramos, com numerosas cicatrizes produzidas pela queda das folhas. O fruto é capsular trilobular e ovóide com diâmetro de 1,5 a 3 cm. Apresenta uma semente em cada cavidade, formado por um pericarpo ou casca dura e lenhosa, indeiscente, inicialmente verde, passando a amarelo e depois preto. Na maturação contém de 53 a 62% de sementes e de 38 a 47% de casca, pesando cada semente de 1,53 a 2,85 g.

A produtividade do pinhão-mansão pode variar muito em função da região de plantio, método de cultivo, tratos culturais e idade da cultura. Arruda et al (2004), citando diferentes autores, apresenta uma produção variando de 500 a 2.000 kg ha⁻¹ de sementes, porém as plantas com maiores produção chegaram a produzir 6.373 kg ha⁻¹ de sementes. Este mesmo autor coloca esta produção como sendo um indicativo de uma produção potencial que pode ser obtida, desde que sejam adotadas práticas de manejo adequadas como adubação equilibrada e irrigação para suprir a necessidade hídrica.

Segundo Carnielli (2008), trata-se de uma planta oleaginosa viável para obtenção de biodiesel, produz no mínimo 2000 kg ha⁻¹ de sementes, podendo chegar, segundo Heiffg (2006) a 3500 kg ha⁻¹, mesmo sem irrigação. Para condições de cultivo melhores, incluindo boas práticas de manejo, boa fertilidade do solo e boa disponibilidade hídrica (entre 900 e 1.200 mm ano⁻¹), acredita-se que a produtividade pode atingir seguramente 5000 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de sementes (TEWARI, 2007). Em muitos países da América do Sul e Central, África e Ásia

há programas oficiais ou iniciativas particulares incentivando o plantio de pinhão-manso, mas em nenhum deles esta cultura é tradicional, nem existem lavouras bem estabelecidas (com pelo menos 5 anos) onde se possa confirmar sua produtividade e rentabilidade (SEVERINO et al., 2007).

O teor de óleo na semente é tido como um dos grandes atrativos desta cultura, apresentando variações de 27 a 40% (ACTHEN et. al., 2008). O óleo pode ser obtido por meio de extração mecânica (prensagem) ou química (solvente) e até mesmo com a combinação dos dois tipos. É rico em componentes de alta qualidade para a queima, o que possibilita a substituição de combustíveis fósseis satisfatoriamente. A substituição do combustível fóssil pelo biocombustível pode reduzir em 55% a emissão de fuligem e em 35% a liberação de hidrocarboneto, substância cancerígena (SATURNINO et al., 2005).

Para a cultura do pinhão-manso, praticamente não se tem informações a respeito do sistema radicular. As poucas informações disponíveis levam em conta apenas observações de natureza botânica, não se aprofundando no que diz respeito a sua distribuição espacial no solo e muito menos a caracterização das zonas de maior atividade. Devido à natureza dinâmica da distribuição do sistema radicular, reconhece-se que sua caracterização é de extrema importância para a determinação dos parâmetros de manejo da aplicação de água, como a profundidade efetiva das raízes, que define a camada de solo a ser umedecida, bem como a profundidade de instalação dos tensiômetros e de aplicação de fertilizantes.

Trabalhos recentes como o de Albuquerque et al. (2007) e Guimarães & Beltrão (2007) apresentam resultados bastante significativos para as práticas de adubação nitrogenada e de irrigação no crescimento inicial da cultura do pinhão-manso. O que mostra que mesmo sendo uma cultura considerada por muitos como pouco exigente em fertilidade e tolerante a seca, quando sem sofrer estas restrições, podem responder muito positivamente. Nos últimos anos algumas incógnitas sobre a planta começaram a ser esclarecidas como, por exemplo, a resistência das mudas (MAES et al., 2009) e das plantas (LUÍS, 2009) de pinhão-manso ao estresse hídrico e o aumento da produtividade quando manejados com irrigação (EVANGELISTA et al., 2011; OLIVEIRA et al., 2012).

2.1.2 Evapotranspiração

A evapotranspiração (ET) é definida como a quantidade de água consumida por uma determinada cultura. Segundo Allen et al. (1998), ET é a combinação da evaporação (E), que é proveniente do solo, e a transpiração (T), relacionada à planta.

Com o desenvolvimento de uma cultura, as taxas de E e T variam, consideravelmente, em função da área foliar (ALLEN et al., 1998). Em culturas anuais, na fase inicial E representa a maior parte do fluxo de ET, uma vez que o solo se encontra exposto quase por completo às variações atmosféricas, devido à pequena área foliar. Na fase de floração/início de enchimento de grãos, devido à grande área foliar, as taxas de T são mais altas que as de E. Nas fases seguintes, E volta a aumentar e T a diminuir, devido à senescência da cultura. Porém, em culturas perenes as taxas de E e T ao longo do desenvolvimento da cultura é diferente em relação às culturas anuais. Para o pinhão manso, pode-se ser dividido em duas fases diferentes, sendo essas: período de estabelecimento e período reprodutivo. No início do estabelecimento (considerado o primeiro ano da cultura), as plantas estão com área foliar baixa fazendo com que as taxas de E representem a maior parte de ET devido a maior exposição do solo as variações atmosféricas. Conforme a planta vai crescendo em altura, ocorre um aumento da área foliar e as que as taxas de T começam a se sobressair em relação às taxas de E. Após o estabelecimento da cultura, o período reprodutivo do pinhão-manso é caracterizado pela fase de senescência foliar e fase reprodutiva. Nos períodos mais quentes do ano, a planta encontra-se em pleno desenvolvimento foliar, fazendo com que as taxas de T sejam maiores em relação às taxas de E. Conforme o período frio do ano vai se aproximando, as folhas começam a cair, fazendo com que as taxas de T comecem a decrescer, ao ponto da planta perder todas as folhas, fazendo com que as taxas de E se sobressaiam às de T.

A medição de ET pode ser realizada por várias metodologias, com destaque para os métodos de balanço de energia, balanço de água no solo e lisimetria de pesagem. Além destes, existem os métodos de estimativa a partir de dados meteorológicos e o tanque de evaporação (ALLEN et al., 1998). A medição de ET com lisímetros de pesagem é o método mais preciso, além de ser possível determinar ET em espaço de tempo variável, em intervalos de dez minutos ou menos (HOWELL et al., 1985; FARIA et al., 2006; CARVALHO et al., 2007). Segundo Aboukhaled, Alfaro & Smith (1982) afirmam que lisímetros são grandes recipientes preenchidos com solo, localizados no campo, apresentando solo nu ou vegetado, onde é possível determinar a evapotranspiração de culturas ou a evaporação do solo nu.

Além do consumo de água da cultura de interesse, define-se também a evapotranspiração de referência (ET_o). Segundo Allen et al. (1998), esta corresponde ao consumo hídrico de uma superfície padronizada de uma vegetação hipotética similar à grama, caracterizada por crescimento vegetativo vigoroso, mantida sem deficiência hídrica, com resistência aerodinâmica de 70 s m^{-1} , altura permanente de 12 cm, albedo de 0,23 e sem sofrer efeito advectivo. Dentre os métodos para se determinar ET_o, o de Penman-Monteith (ALLEN,

1986; SMITH, 1991; ALLEN et al., 1998) é considerado o método padrão, sendo ETo calculada com dados de radiação, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento.

Na literatura valores de ET do pinhão-mansão ainda são escassos. Da pouca informações existente, a maioria é referente a estimativas. Suterer (2010) determinou ET com base no coeficiente de cultivo do pinhão-mansão proposto por Allen et al. (1998) e ETo da localidade (Tan-Tan, Marrocos), estimando valores variando de 1,9 mm dia⁻¹ nos períodos de desenvolvimento e término e 5,5 mm dia⁻¹ no período de médio (reprodutivo). Porém, esses valores não podem ser considerados como reais da cultura devido ao fato de que foram gerados a partir de estimativas.

2.1.3 Evaporação e Transpiração

Segundo Reichardt (1985), Sinclair (1990) e Allen et al. (1998), a evaporação consiste na passagem da água do solo da forma líquida para a forma gasosa na atmosfera, sendo este processo único e exclusivamente regido por leis físicas.

Usualmente E é medida em condições de solo nu usando lisímetros (WALKER, 1983). Em condições de solo cultivado, modelos como o de Ritchie (1972) são considerados adequados para estimar E, já que não se consegue sua medição separadamente de T usando lisímetros. O modelo de Ritchie (1972), constituiu um grande avanço na quantificação de E e T separadamente. A estimativa de E é obtida por meio da repartição da energia que conduz os dois processos em função do índice de área foliar, usando uma descrição matemática simples do processo evaporativo em duas fases distintas, a fase 1, “fase limitada pela energia”, e a fase 2, “fase de redução da evaporação”.

Assim, como alternativa para medição de E em solo cultivado destacam-se os microlisímetros (BOAST & ROBERTSON, 1982; WALKER, 1983; EVETT et al., 1995). Os microlisímetros são constituídos de pequenos tubos preenchidos com solo de estrutura intacta, instalados ao nível do solo e pesados periodicamente para medição de E pela diferença de massa no período. Até o momento, alguns trabalhos foram realizados visando desenvolver microlisímetros para medir E em condições de solo nu ou cultivado, sendo os mais conhecidos os tipos apresentados por Boast & Robertson (1982), Allen (1990) e Evett et al. (1995).

O processo transpiratório consiste na vaporização da água contida nos tecidos das plantas e na remoção desse vapor em direção à atmosfera (SINCLAIR, 1990; ALLEN et al., 1998; TAIZ e ZEIGER, 2004). Segundo Reichardt (1985), Sinclair (1990), Allen et al. (1998)

e Taiz e Zeiger (2004), esse processo é governado por leis físicas, mas limitado por fenômenos biológicos.

Conforme Smith e Allen (1996) e González-Altozano et al. (2008), dentre as diferentes metodologias utilizadas para determinar a transpiração de plantas, aquelas baseadas na determinação do fluxo de seiva são certamente as melhores. Independente da técnica utilizada, as técnicas baseadas no fluxo de seiva apresentam algumas características que as destacam em relação às demais, como por exemplo: portabilidade, facilidade de automação, longo tempo de monitoramento, resolução temporal, qualidade das medidas e não contaminação dos dados, pois mede diretamente T.

No entanto, ainda persistem nos dias atuais algumas dificuldades relacionadas às técnicas de determinação do fluxo de seiva, como por exemplo: calibração e validação, alto custo, dificuldade operacional e necessidade de conhecimento técnico apurado.

Desta forma, embora valores de T possam ser determinados diretamente por meio da utilização de técnicas de fluxo de seiva, o uso de lisímetros de pesagem possibilita determinar T a partir de ET. Os valores de T podem ser determinados pela diferença entre ET e E, medindo-se ET em lisímetros e E em microlisímetros, isolando desta forma os valores de T como o resíduo dos componentes.

2.1.4 Coeficiente de cultivo simples e dual

Por meio da razão entre ET da cultura de interesse mantida sem limitação hídrica e ET_0 , determina-se o coeficiente de cultivo simples (K_c). Este coeficiente representa a integração dos diferentes efeitos que fazem com que a cultura de interesse apresente comportamento diferente da cultura de referência. Segundo Lascano & Sojka (2007), o K_c é requerido nas fases de dimensionamento e manejo da irrigação.

Segundo Allen et al. (1998), K_c pode ser dividido em dois, sendo um o coeficiente de cultivo simples e outro o dual. K_c simples é determinado a partir da razão direta entre ET e ET_0 , diferentemente do K_c dual, em que o K_c é fragmentado em coeficiente de cultivo basal (K_{cb}) e coeficiente de evaporação (K_e). Assim, K_{cb} é determinado a partir da razão entre T e ET_0 e K_e a partir da razão entre E e ET_0 .

Ainda de acordo com Allen et al. (1998), no K_c simples a evaporação e a transpiração estão combinadas em um componente (ET), com isso não há a possibilidade de se determinar a demanda hídrica fragmentada na planta e no solo. No K_c dual isto não ocorre, pois, ao repartir ET em E e T, portanto K_e e K_{cb} , determinam-se o consumo específico da

planta e do solo em relação à demanda atmosférica. Assim, o manejo de irrigação pode ser melhorado para otimizar a aplicação de água as culturas em curtos espaços de tempo, como em período diurno e noturno de um dia.

2.2 Material e métodos

2.2.1 Caracterização da área experimental

O estudo foi conduzido na área experimental da Fazenda Areão da ESALQ/USP na cidade de Piracicaba-SP, localizada nas coordenadas geográficas de 22° 41' 58'' de latitude Sul e 47° 38' 42'' de longitude Oeste e aproximadamente 511m de altitude. Este foi realizado durante o período de março de 2012 a abril de 2013. O solo do local é classificado como Nitossolo (EMBRAPA, 2006), apresentando textura argilosa na camada 0-40 cm e muito argilosa na camada 40-120 cm e densidade média variando de 1,4 a 1,46 g cm⁻³ (Flumignan, 2011).

O clima de Piracicaba é considerado do tipo subtropical úmido com verão quente (Cwf), a classificação de Köppen-Geiger (KOTTEK et al., 2006). É caracterizado por grandes volumes de chuvas no verão e por estiagem no inverno. A temperatura média dos meses mais frios gira em torno de 17°C e nos mês mais quentes em torno de 24,8°C, sendo a média anual de temperatura de 21,6°C. A precipitação acumulada média é de 1.328mm (CEPAGRI, 2011).

A área experimental foi preparada para o plantio das mudas durante o segundo semestre de 2011. Primeiramente foram coletadas amostras de solo para análise química de nutrientes em laboratório e, na sequência, foi realizada a escarificação do mesmo. Por meio da análise química de nutrientes do solo, foi realizada a adubação de correção de fertilidade de todo o solo da área experimental juntamente com a calagem. A incorporação dos nutrientes foi realizada com grade pesada e seguiram-se as recomendações de FACT (2010) para a aplicação de fertilizantes.

A produção de mudas foi realizada em casa de vegetação do Departamento de Engenharia de Biosistemas da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” durante o período de setembro a dezembro de 2011, sendo estas transplantadas na última semana de dezembro de 2011 para o campo experimental (Figura 1a a d). As mudas foram plantadas em covas abertas por uma broca escavadeira acoplada a um trator. As plantas foram dispostas no espaçamento de 3 m entre plantas e 4 m entre linhas (12 m² de área para cada uma). Após o

transplântio das mudas, foram realizadas irrigações constantes em toda a área experimental durante o primeiro mês para garantir o estabelecimento das plantas no campo (Figura 1d a f).

O experimento incluiu três diferentes tratamentos com duas repetições cada, sendo eles: tratamento irrigado por pivô central, gotejamento e sem irrigação. A disposição dos tratamentos no campo e a área total utilizada para cada tratamento foi 1 ha para o tratamento irrigado por pivô central e 0,5 ha para cada um dos demais tratamentos (Figura 2). É importante ressaltar a proximidade do experimento da estação meteorológica da Fazenda Areão da ESALQ/USP, algo imprescindível na determinação de coeficiente de cultivos possibilita afirmar que a determinação de coeficiente de cultivo seja feita de forma adequada (ALLEN et al., 1998).

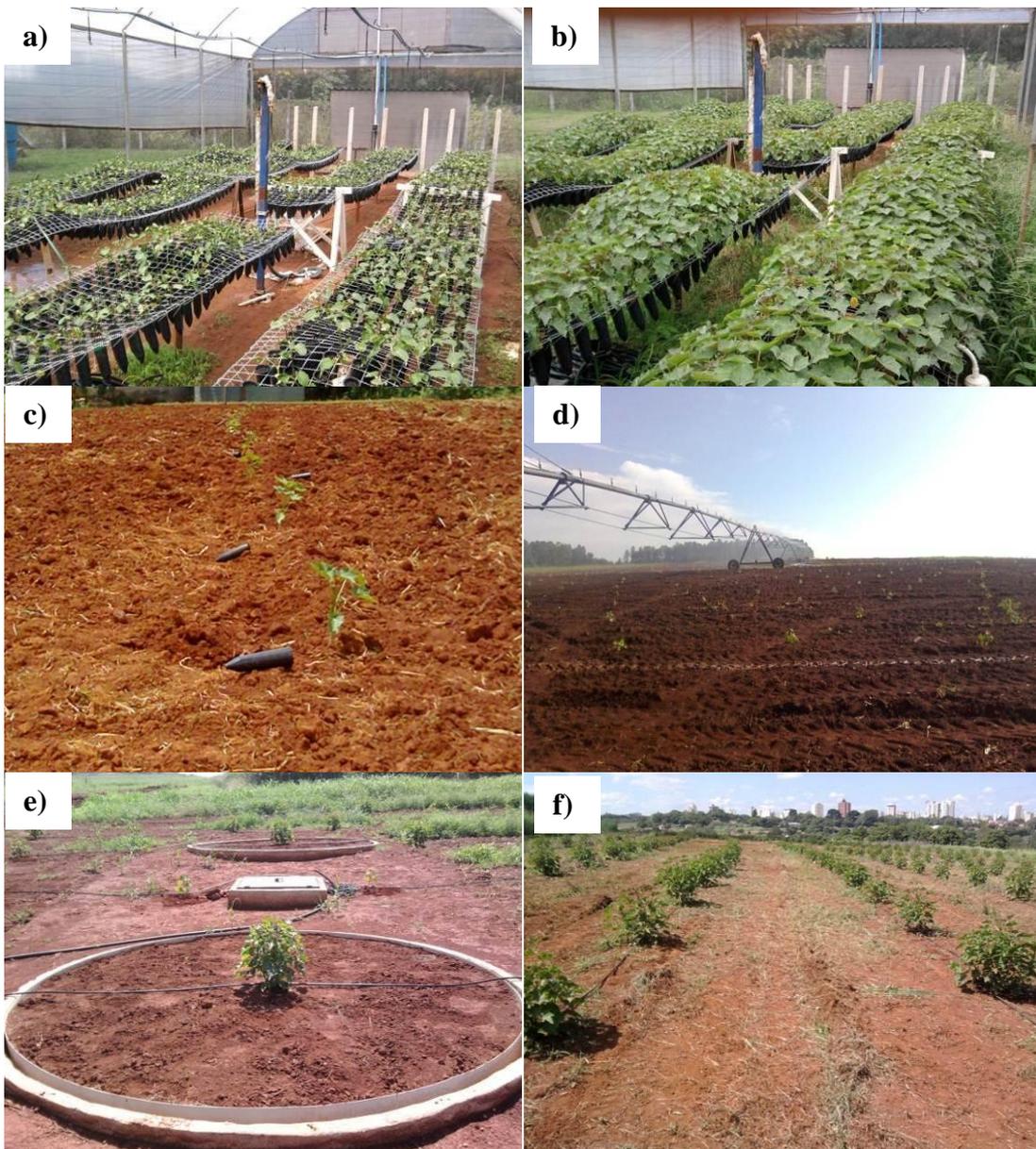


Figura 1– Produção de mudas (a e b), transplântio (c e d) e estabelecimento das plantas no campo (e e f)

A estação meteorológica foi construída em uma área de 0,44 ha, sendo toda ela gramada. Frequentemente foi realizada roçagem da grama para que a mesma ficasse com altura constante próxima de 12 cm e, com um sistema de irrigação automatizado, a grama foi conduzida com condição hídrica adequada. A estação dispõe de um *datalogger* (Modelo CR23X, Marca Campbell Scientific®) para leitura dos sensores de temperatura, umidade relativa do ar, radiação solar global, velocidade e direção do vento, pressão atmosférica, saldo de radiação e chuva. Os dados foram coletados nas escalas de 15 min, horário e diário. Os valores brutos foram transferidos para computador e, então, realizou-se o cálculo de ETo pelo método Penman-Monteith na escala horária e diária, seguindo a padronização do método disposta em Allen et al. (1998). A estimativa dos valores de ETo foi realizada usando o software REF-ET (ALLEN, 2000).

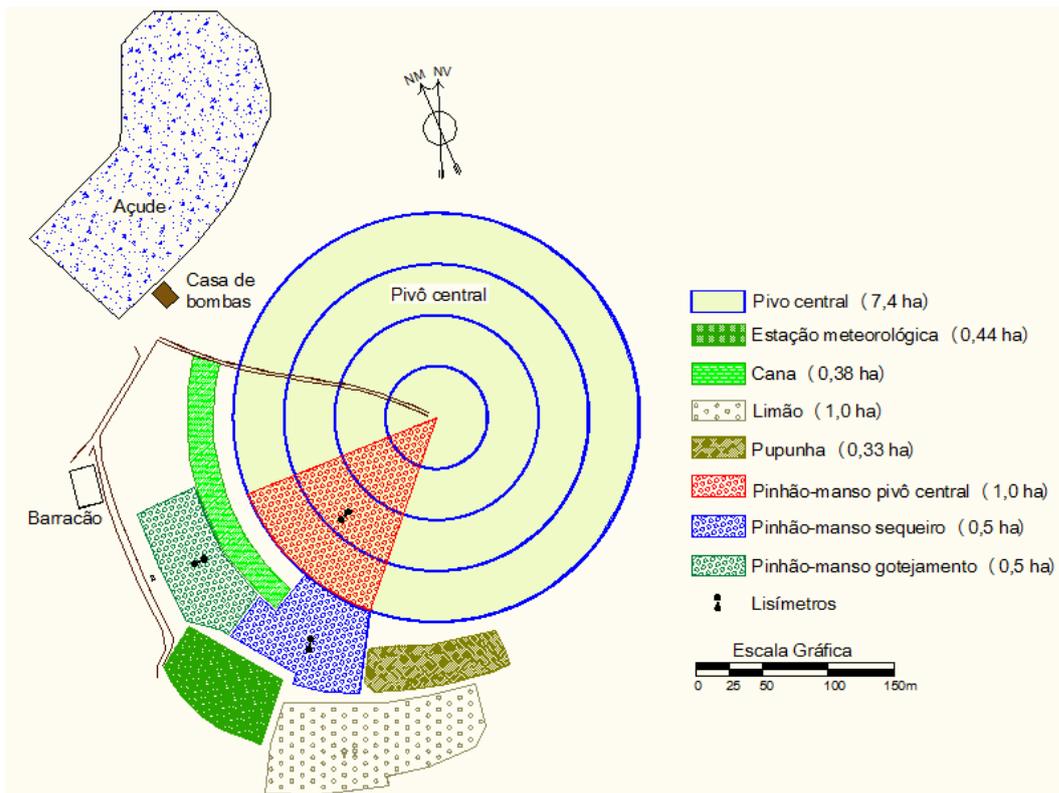


Figura 2 – Croqui da área experimental contendo os tratamentos e a estação meteorológica

2.2.2 Manejo da cultura

A área experimental foi manejada utilizando técnicas agronômicas para o controle de pragas, doenças e plantas invasoras. A área foi monitorada durante todo o período do

experimento e o controle de pragas e doenças foi realizado sempre que estas atingiam o nível de controle.

Em função da escassez de informações na literatura e de existirem apenas três registros de defensivos recomendados para o pinhão-manso no Ministério da Agricultura do Brasil, sempre que detectada alguma doença na área, foi enviado material vegetal contaminado ao Laboratório de Fitopatologia. Quando o problema foi com insetos praga, o material foi enviado ao laboratório de Entomologia Agrícola. Após serem feitas as devidas análises, foram recomendados os produtos específicos para os patógenos e pragas encontrados, os quais foram aplicados na dosagem e periodicidade recomendados. O controle de ervas invasoras foi realizado por roçadeira motorizada manual, em uma frequência bimensal no inverno e mensal no verão. Além da roçagem, foi feita capina de coroamento das plantas e quando necessário, foi aplicada herbicida na entrelinha de cultivo.

O manejo da irrigação dos tratamentos pivô e gotejamento foi realizado em escalas diferentes, porém, obedecendo ao mesmo critério, ou seja, a evapotranspiração determinada pelos lisímetros de pesagem instalados na área. A determinação da quantidade de água necessária para repor a evapotranspiração foi calculada semanalmente, bem como a irrigação do tratamento pivô. Já no tratamento irrigado por gotejamento, o cálculo da evapotranspiração foi semanal, porém, a reposição foi dividida em três vezes a cada semana, na segunda, quarta e sexta-feira. Em ambos os casos a irrigação foi feita visando repor toda a água evapotranspirada no período de uma semana.

O acionamento do sistema de irrigação localizada foi realizado de forma automatizada com auxílio de painel eletrônico. No tratamento irrigado por pivô central, o acionamento do sistema foi realizado manualmente.

A lâmina média aplicada no período foi em torno de 3 mm no tratamento irrigado por gotejamento e de 20 mm no pivô central, neste a lâmina correspondia a 25% da velocidade de caminhamento do pivô.

Para a aplicação da lâmina de irrigação calculada semanalmente no tratamento pivô central, o percentímetro da velocidade de caminhamento foi ajustado a cada irrigação, permitindo a reposição correta da lâmina de irrigação, o que se constatava pela massa dos lisímetros.

Antes da implantação da cultura, foi feita a adubação de fundação e correção do solo, além disso foram realizadas outras três adubações complementares durante o período do experimento. Essas adubações foram realizadas seguindo recomendações de FACT (2010). O adubo foi distribuído manualmente sob a área de projeção da copa de cada planta.

2.2.3 Lisímetros de pesagem

A determinação da evapotranspiração nos tratamentos foi realizada pelos lisímetros de pesagem direta. Essa metodologia consiste na utilização de tanques com solo que são apoiados sobre um sistema de pesagem de alta precisão. Basicamente o sistema de lisimetria proporciona a medição das entradas e saídas de água do sistema.



Figura 3 – Representação da estrutura de alvenaria que sustenta os lisímetros e e preenchidos com solo após instalação (Flumignan, 2011)

Antes que os lisímetros pudessem ser instalados foi construída a estrutura de alvenaria necessária para apoiar os lisímetros e isolar o sistema do solo externo. Segundo Flumignan (2011), a estrutura de alvenaria foi dividida em três partes, sendo dois círculos abertos onde foram inseridos os lisímetros e um fosso de acesso (Figura 3).

Foram utilizados dois lisímetros por tratamento (totalizando seis lisímetros) no experimento e estes foram previamente dimensionados para que sua superfície respeitasse o espaçamento das plantas. Assim, os tanques dos lisímetros foram confeccionados em aço carbono, circular com 12 m² de superfície por 1,3 m de profundidade útil do solo, sendo o fundo confeccionado de forma cônica para direcionar a água de drenagem. A estrutura de aço carbono foi apoiada sobre três pilares de concreto, onde ficou a célula de carga (uma célula

por pilar). Juntamente com os lisímetros foram instalados dois tubos de PVC no sentido horizontal, cuja função era armazenar a água de drenagem do sistema. Estes foram conectados por duas mangueiras e por um registro, o que possibilitava a abertura dos mesmos para eliminar a água armazenada. Na Figura 4 encontra-se o esquema do lisímetro instalados e todas as estruturas.

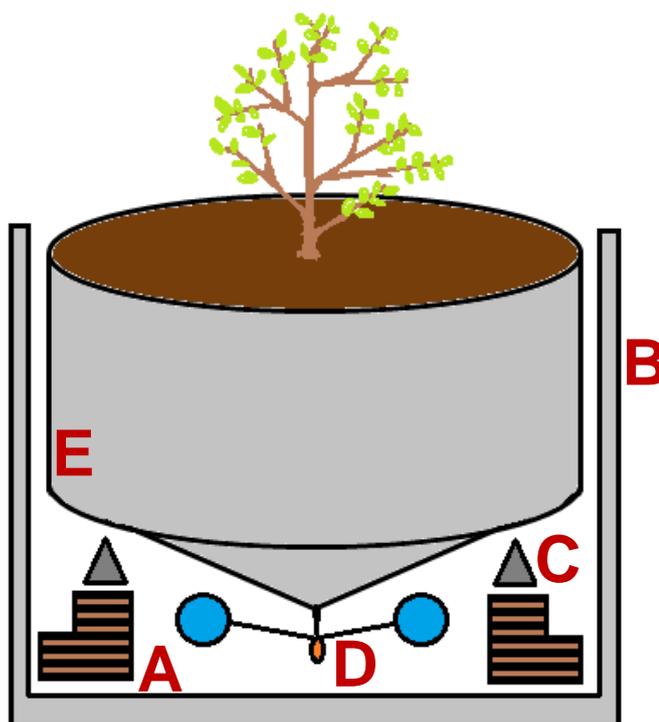


Figura 4 – Esquema com os pilares de concreto (A), a estrutura de alvenaria (B), as células de carga (C) e os tubos de armazenamento de água de drenagem (D) dos lisímetros de pesagem (E)

2.2.4 Sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados teve a função de determinar todas as variações de massa que ocorreram nos lisímetros de pesagem. O sistema como todo era composto por células de carga e *dataloggers*. No experimento foram utilizados um total de 18 células de carga e três *datalogger*. As células de carga eram da ALFA[®] instrumentos (modelo M-10T) e da HBM[®] (modelo RTNC3/10T), ambas com capacidade para 10 T cada, e o *datalogger* da Campbell Scientific[®] (modelo CR-1000). Em cada tratamento foi utilizado um lisímetro apoiado sobre três células de carga da ALFA[®] e outro apoiado sobre três células de carga da HBM[®].

Uma vez que os lisímetros estavam apoiados sobre as células de carga e as mesmas estavam conectadas ao *datalogger*, possibilitou-se que a coleta de dados fosse realizada. O

datalogger, alimentado por uma bateria de 12 V, coletava as informações obtidas das células de carga através de pulsos elétricos gerados por ele. O *datalogger* excitava as células de carga, cujo sinal retornava em forma de mV. A partir de uma equação de calibração inserida no *datalogger*, os dados enviados pelas células de carga eram transformados de mV em kg. Em cada *datalogger* de cada tratamento foi inserida uma equação de calibração descrita no trabalho de Flumignan (2011).

A coleta dos valores em kg de cada célula de carga foi realizada a cada 3 segundo, sendo gerada uma média do conjunto de células ao término de 10 min (média de 200 valores). Essa média foi realizada para cada conjunto de célula de carga, ou seja, foi obtido um valor médio da massa de cada lisímetro de cada tratamento. Além da coleta de dados, o *datalogger* tinha a função de armazená-los em uma memória inteira. Os dados armazenados foram transferidos para um cartão de memória móvel e, então, para um computador. Com o auxílio do software LoggerNet (versão 3.3.1), os valores coletados no *datalogger* foram convertidos em arquivos compatíveis com o Microsoft Office Excel[®].

Após a transferência dos dados armazenados no *datalogger* para o computador foi possível obter o armazenamento de água do solo de cada lisímetro de cada tratamento. A conversão do valor da massa de cada lisímetro (kg) em milímetros de água foi realizada dividindo-se por 12 (área do lisímetro, em m²). Devido à elevada massa dos lisímetros (em torno de 28500 kg), foi necessário rearranjar os valores para que os dados ficassem numa escala de 0 a 300 mm. O armazenamento de água do solo na capacidade de campo (CC) foi obtido ao final de quatro dias após a ocorrência de chuva suficiente para saturar o solo, conforme Bernardo et al. (2005). Esse período ocorreu no início de julho de 2012 com precipitação acumulada de 75 mm em 7 dias consecutivos. Assim, a CC foi ajustada para que o armazenamento de água do solo ficasse exatamente na linha referente a 200 mm. O armazenamento de água no solo no ponto de murcha permanente (PMP) foi obtido a partir da caracterização física do solo do local (Flumignan, 2011), em que mostrou valor de água disponível variando de 5 a 7%, com umidade em base de volume. Portanto, para a profundidade do solo de 1,3 m (ou 1300 mm), o valor de 7% da capacidade de água disponível (CAD) foi igual a 90 mm (7% dos 1300 mm). Assim, descontando 90 mm do valor do armazenamento na CC (200 mm), o armazenamento no PMP foi de 110 mm.

A coleta e análise de dados dos lisímetros foram fundamentais para que o manejo de irrigação fosse realizado de maneira adequada nos tratamentos irrigados por pivô central e gotejamento. Essa foi realizada semanalmente, sendo o manejo de irrigação realizado conforme descrito no item 2.2.2.

2.2.5 Avaliação do crescimento das plantas

O crescimento das plantas nos tratamentos irrigados por pivô central, gotejamento e sem irrigação foi determinados nos dias 20 de dezembro de 2011, 25 de abril, 22 de maio, 1º e 29 de novembro de 2012, 23 de janeiro e 26 de fevereiro de 2013. Determinou-se a altura das plantas do nível do solo até o ponto mais alto da mesma com fita métrica. Foram determinadas as alturas de 10 plantas por tratamentos, sendo as duas plantas dos lisímetros mais oito escolhidas aleatoriamente na área.

2.2.6 Determinação da evapotranspiração e coeficiente de cultivo simples

A evapotranspiração (ET) foi determinada pela contabilidade das entradas, saídas e armazenamento de água nos lisímetros de acordo com a eq. 1:

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

em que ET é a evapotranspiração, P é a precipitação, I é a lâmina de água irrigada, R é o escoamento superficial, D é a drenagem e ΔA é a variação de armazenamento de água nos lisímetros (todas unidades em mm). O valor de R foi considerado nulo devido a borda elevada dos lisímetros (cerca de 3 cm) e a precipitação foi medida na estação meteorológica automática situada ao lado do experimento. Uma maior compreensão do comportamento das entradas e saídas de água no sistema de lisímetro de pesagem encontra-se na Figura 5.

Os valores de Kc dos tratamentos irrigados foram determinados de acordo com a eq. 2:

$$Kc = \frac{ET}{ET_o} \quad (2)$$

sendo Kc o coeficiente de cultivo (adimensional), ET a evapotranspiração (mm dia^{-1}) e ET_o a evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}). Valores diários de ET_o foram calculados no programa REF-ET (ALLEN, 2000) pelo método Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998) usando dados diários da estação meteorológica automática da Fazenda Areão, situada ao lado do experimento.

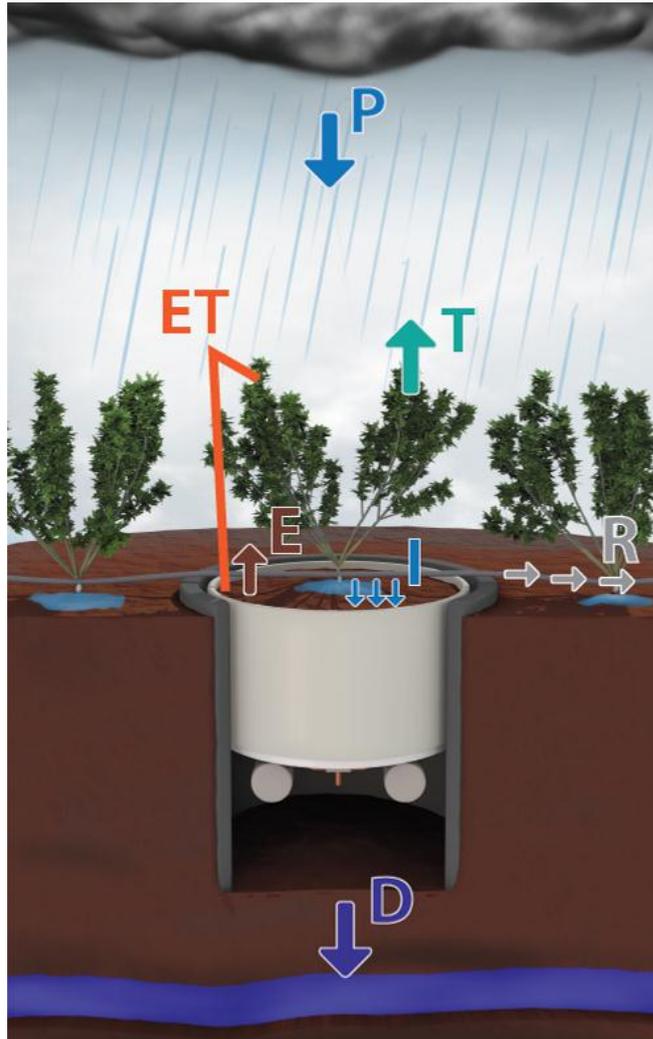


Figura 5 – Balanço hídrico do sistema de lisímetro de pesagem com as entradas e saídas de água do sistema, sendo ET a evapotranspiração, E a evaporação, T a transpiração, I a irrigação, R o escoamento superficial e P a precipitação

2.2.7 Determinação da evaporação, transpiração e coeficiente de cultivo dual

A determinação da evaporação foi realizada utilizando a metodologia do microlisímetro (ML) de pesagem. Foram utilizados ML adaptados de Boast e Robertson (1982) por Flumignan et al. (2012), sendo esses constituídos de tubos de PVC (linha esgoto predial) com 100 mm de diâmetro e 150 mm de comprimento. O envoltório externo utilizado também foi de PVC, porém com diâmetro de 150 mm. Para fechar o fundo do ML foi utilizado um CAP de PVC para o diâmetro de 100 mm (Figura 6).

Em função da dificuldade de instalação dos ML no solo, foi desenvolvido um amostrador para facilitar a instalação. A construção do equipamento foi encomendada à empresa SondaTerra[®] Equipamento. A escolha do material aço inox na fabricação do amostrador foi devido ao fato do processo de inserção do ML no solo ser muito rústico, o que

se previa a necessidade de um material resistente. O amostrador foi confeccionado com dimensões do ML (100 mm de diâmetro), sendo esse composto por um cilindro de corte (onde foi inserido o tubo de PVC), uma base para receber o impacto dos golpes, um peso para fazer os golpes (em torno de 10 kg) e uma haste para direcionar o peso de batida. Na Figura 7 encontra-se a sequência do processo de instalação dos ML no solo utilizando o amostrador que foi denominado de amostrador do tipo Huland modificado.

A determinação da evaporação por meio de ML de pesagem foi realizada em cinco datas. As avaliações transcorreram nos períodos de 09 a 14/07/2012 (Série 1), de 27/09 a 01/10/2012 (Série 2), de 28/11 a 01/12/2013 (Série 3), de 22 a 23/01/2013 (Série 4) e de 06 a 10/04/2013 (Série 5). Durante o primeiro semestre de 2012 não foi possível ser realizada a determinação da evaporação do solo devido à demora na confecção do amostrador.

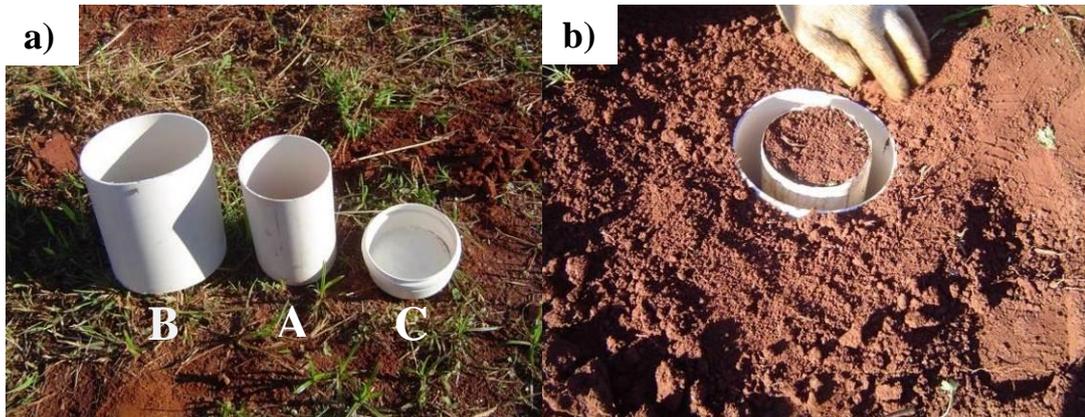


Figura 6 – Componentes do microlisímetro (a), sendo o microlisímetro (A), o envoltório externo (B), o CAP para fechar o fundo (C) e o microlisímetro instalado no solo (b)

A evaporação foi medida pela diferença diária de massa do ML pesada sempre no mesmo horário com balança de 0,01 g de precisão. A conversão da massa de água perdida diariamente (g) em evaporação (mm) foi realizada conforme a eq. 3:

$$E = \frac{\Delta M}{\pi r^2} + P + I \quad (3)$$

sendo E a evaporação (mm), ΔM a diferença de massa (g) do ML de um dia para o outro, r o raio do ML (m^2), P a precipitação (mm) e I a irrigação (mm). O valor de T foi calculado pela diferença entre ET determinada pelos lisímetros e E média medida nos ML, representado na eq. 4:

$$T = ET - E \quad (4)$$

sendo T a transpiração, ET a evapotranspiração e E a evaporação (todos em mm).

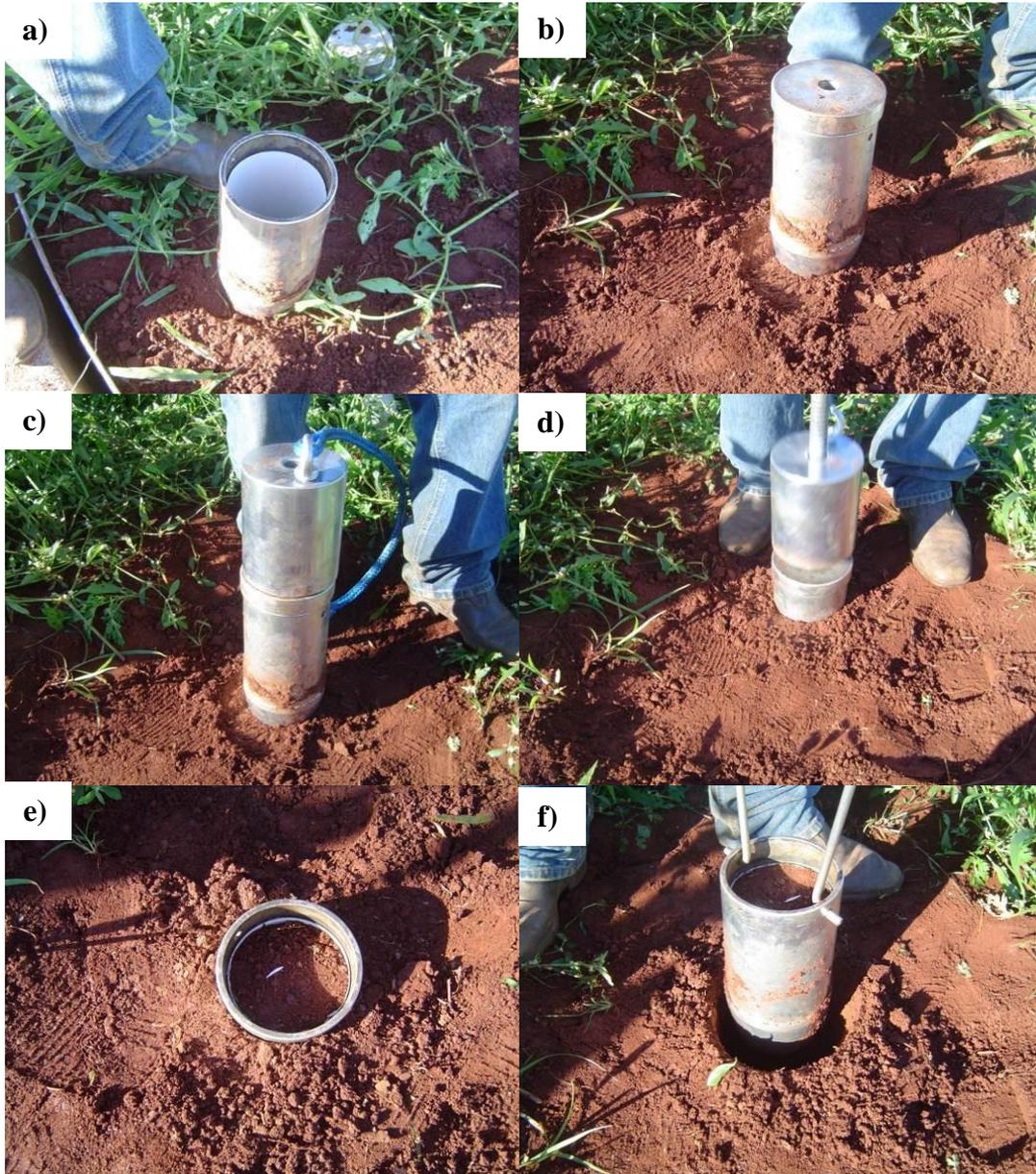


Figura 7 – Amostrador de solo Uhland modificado com a sequência de instalação do microlisímetro. Inserção do tubo do cilindro de PVC de 100 mm de diâmetro dentro do cilindro de corte (a); montagem da base (b), do peso de batida (c) esquema do golpe no cilindro de corte (d); cilindro cravado com o tubo de PVC preenchido com solo (e) e; remoção do cilindro (f)

Por fim, de posse dos dados de E e T foram determinados os coeficientes de evaporação (K_e) e de cultivo basal (K_{cb}) dividindo os valores de E e T, respectivamente, pela E_{To} determinada pelo método ASCE Penman-Monteith (ASCE-EWRI, 2005). Os valores de E_{To} foram determinados na escala horária e integrados para compreender o mesmo período de avaliação dos ML. Os valores de K_{cb} e K_e foram determinados de acordo com eq. 5 e eq. 6, respectivamente (ALLEN et al., 1998):

$$K_{cb} = \frac{T}{ET_o} \quad (5)$$

e

$$K_e = \frac{E}{ET_o} \quad (6)$$

sendo K_{cb} o coeficiente de cultivo basal (adimensional), K_e o coeficiente de evaporação (adimensional), T a transpiração (mm), E a evaporação (mm) e ET_o a evapotranspiração de referência (mm).

2.2.8 Teste dos microlisímetros

Devido à diferença no diâmetro dos envoltórios externos utilizados na avaliação da evaporação do solo desse trabalho em comparação aos de Boast e Robertson (1982) adaptado por Flumignan et al. (2012), foi realizado um ensaio para verificar a possível influência na determinação da evaporação em função do diâmetro do envoltório externo. Foram utilizados seis ML com dois diâmetros do envoltório externo, três com o diâmetro usado no experimento (150 mm) e outros três com o diâmetro menor (120 mm) (Figura 8).

O teste dos diferentes diâmetros de envoltório externo foi realizado durante 18 a 22 de abril de 2013. A comparação nas determinações de E em função do comprimento do diâmetro externo foi realizada a partir de análise de variância (ANOVA) utilizando o Software SISVAR com o teste Tukey a 5% de probabilidade.

Devido ao fato de que poderia haver diferença de E entre o solo do lisímetro e o solo ao redor dele, foi realizada uma avaliação nas Séries 1 e 2 para verificar essa possível diferença. Para isso, foram instalados ML dentro e fora do solo do lisímetros e, no último dia das Séries 1 e 2, foram coletadas amostras de solo para determinação da umidade gravimétrica. Essa comparação foi realizada a partir da análise de variância (ANOVA) utilizando o Software SISVAR com o teste Tukey a 5% de probabilidade para comparação da umidade volumétrica dos ML instalados dentro e fora do lisímetro das Séries 1 e 2. Para isso, a umidade gravimétrica foi determinada coletando-se amostras de solo a 8 cm de profundidade e o cálculo foi realizado conforme a eq. 7:

$$U_g = \frac{(Mu - T) - (Ms - T)}{(Ms - T)} \quad (7)$$

sendo Ug ($g\ g^{-1}$) a umidade gravimétrica, Mu do solo úmido (g), Ms a massa do solo seco (g) e T é a massa do cadinho (g). A partir da umidade gravimétrica verificou-se a umidade volumétrica. Sua determinação foi realizada conforme eq. 8:

$$\theta = Ug \times ds \quad (8)$$

sendo θ a umidade volumétrica ($cm^3\ cm^{-3}$), Ug a umidade gravimétrica ($g\ g^{-1}$) e ds a densidade do solo ($cm^3\ cm^{-3}$).



Figura 8 – Ensaio extra do microlisímetro comparando dois diferentes diâmetros de envoltório externo

Em função da grande quantidade de dados necessários para se determinar a diferença de E nos ML instalados dentro e fora do solo do lisímetro, foram utilizados 36 ML na Série 1, sendo 12 por tratamento, sendo seis instalados dentro dos lisímetros e seis fora dos lisímetros. Na Série 2 foram utilizados a metade de ML em relação à Série 1 (total de 18). Estes foram divididos em seis por tratamento e destes, 3 foram instalados dentro do lisímetro e 3 fora (somente nos lisímetros com célula da HBM[®]). Mediante as análises estatísticas realizadas nas Séries 1 e 2, nas demais séries os ML foram instalados somente dentro do solo dos lisímetros.

2.3 Resultados e discussão

2.3.1 Armazenamento de água no solo, evapotranspiração e coeficiente de cultivo simples

2.3.1.1 Crescimento das plantas

Do início ao término do experimento as plantas cresceram cerca de 180 cm, sendo que em fevereiro de 2013 estavam com altura média de 200 cm nos três tratamentos (Figura 9). O crescimento das plantas nos três tratamentos foi muito semelhante durante todo o experimento, podendo ser caracterizado por três fases: estabelecimento da cultura (de dezembro de 2011 a abril de 2012), senescência foliar (de abril a outubro de 2012) e primeiro ciclo reprodutivo (de outubro de 2012 a março de 2013).

A fase de estabelecimento das plantas de pinhão-manso foi caracterizada por crescimento médio de 75 cm. Isto representou crescimento diário de 0,5 cm. No período em que ocorreu a desfolha das folhas das plantas, o incremento médio de altura foi de 0,2 cm dia⁻¹. Nesse período as plantas tiveram crescimento total de 40 cm. A primeira fase reprodutiva foi o período em que ocorreu o maior crescimento médio diário (0,75 cm dia⁻¹), porém, o crescimento total das plantas foi apenas o segundo maior entre as três fases, sendo cerca de 65 cm.

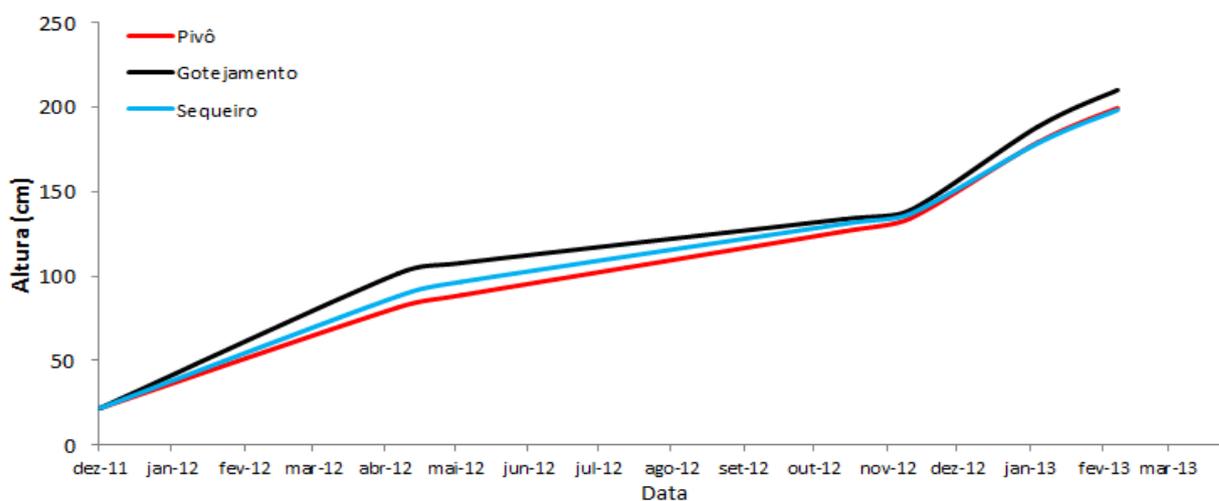


Figura 9 – Altura das plantas (em cm) de pinhão-manso dos tratamentos irrigados por pivô central, gotejamento e sem irrigação durante o período de dezembro 2011 a abril de 2013

2.3.1.2 Avaliação do desempenho dos lisímetros

A seguir descreve-se a variação de massa de três lisímetros sob os tratamentos em estudo, durante dias consecutivos (24/02 a 03/03/2013). A precipitação acumulada nos cinco dias anteriores a essa avaliação foi de 40 mm, evidenciando que o solo se encontrava próximos da condição de capacidade de campo. Com isso, no período da avaliação não foram realizadas irrigações. Assim, pode ser observado um comportamento muito semelhante nos cinco dias entre os três tratamentos, caracterizado por um decréscimo de massa do armazenamento (perda em kg de água) entre às 07:00 e às 18:00, período de maior demanda atmosférica (ETo) (Figura 10). Além disso, foi observado que entre às 19:00 e às 06:00 não houve perdas de água dos lisímetros, período em que não ocorreu demanda atmosférica.

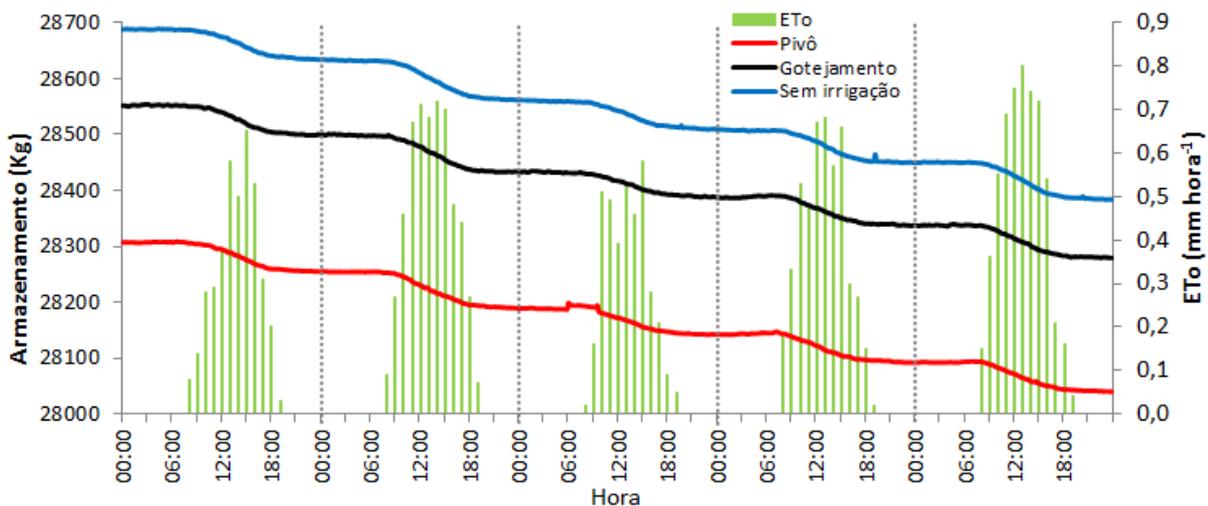


Figura 10 – Curso do armazenamento de água no solo a cada 10 min (kg) e evapotranspiração de referência horária (ETo, mm hora⁻¹) durante cinco dias (de 27 de fevereiro a 03 de março de 2013) dos tratamentos irrigados por pivô central, gotejamento e sem irrigação

A variação do armazenamento horário transcorrido durante um dia (27 de fevereiro de 2013) é mostrada na Figura 11. Foi observado que a variabilidade do armazenamento de água nos lisímetros está diretamente relacionada à ETo. No período em que os valores de ETo eram nulos (20:00 às 07:00), os lisímetros permaneceram com o armazenamento de água no solo praticamente estável durante o período noturno. Conforme ETo horária acumulada foi aumentando (das 08:00 às 15:00), a perda de água dos lisímetros foi aumentando proporcionalmente. Entre os períodos de 16:00 às 19:00 os valores de ETo horária acumulada foram diminuindo, fazendo com que a perda horária de água nesse período fosse menor em relação ao período de maior demanda.

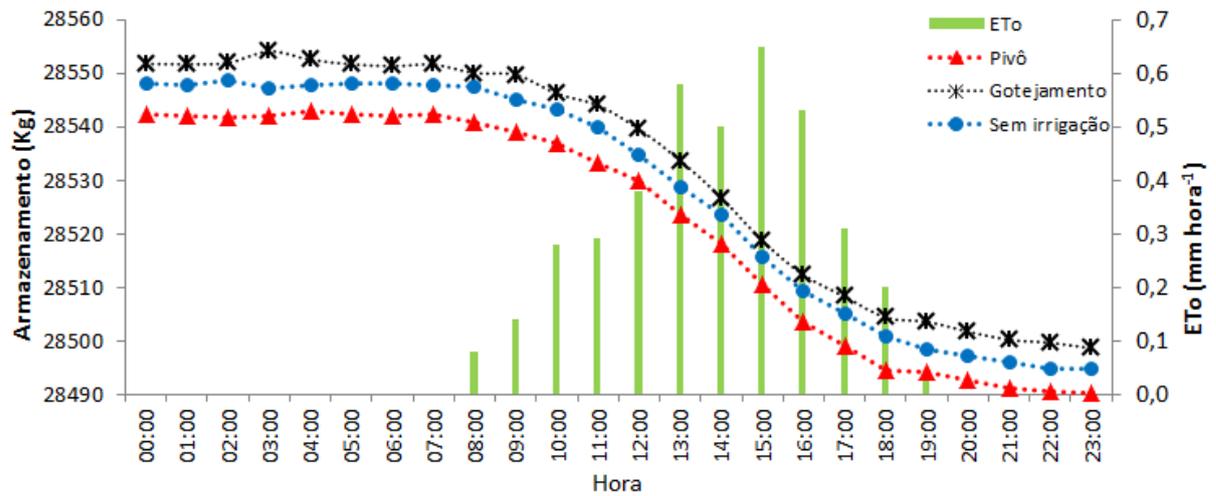


Figura 11 – Curso do armazenamento de água no solo horário (kg) e evapotranspiração de referência horária (ETo, mm hora⁻¹) durante 24 horas dos tratamentos irrigados por pivô central, gotejamento e sem irrigação no dia 27 de fevereiro de 2013

Esse comportamento diário do armazenamento de água no solo foi muito característico durante todo o período analisado, possibilitando a coleta de valores confiáveis de ET da cultura do pinhão-manso. Utilizando a eq. 1 para o cálculo de ET nesse dia, pode se observar que, como não houve entrada e saída de água no sistema, os valores de ET ficaram condicionados a diferença de armazenamento de água (ΔM) de um dia para o outro. Como os dados estão representados em kg, a transformação dessa unidade para mm foi realizada dividindo-se a massa por 12 (área do lisímetro em m²).

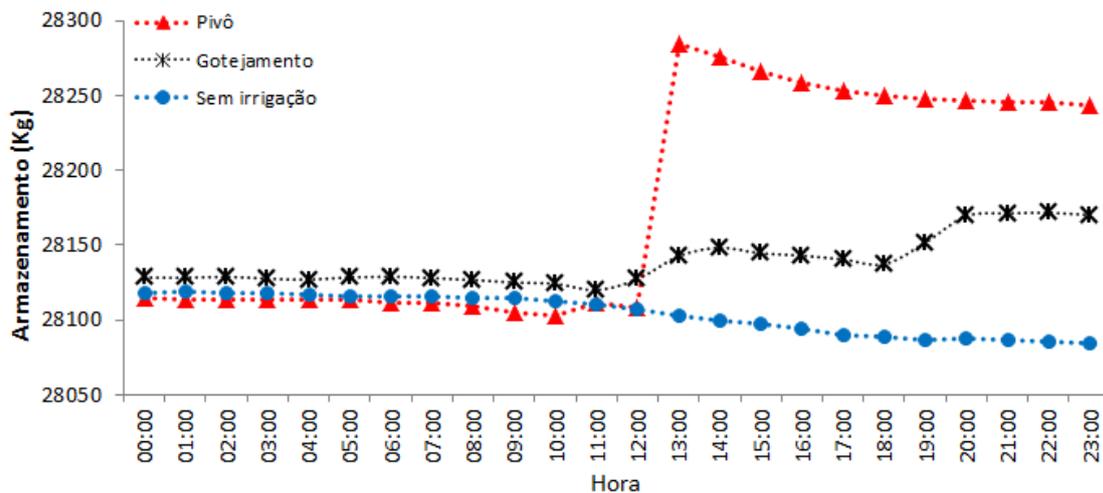


Figura 12 – Curso do armazenamento de água no solo horário (kg) durante 24 horas referenciando irrigações nos tratamentos irrigados em comparação ao sem irrigação no dia 3 de outubro de 2012

Apesar do armazenamento de água no solo ser muito comum ao encontrado na Figura 11, em alguns períodos este variou em função da precipitação, da irrigação e da drenagem. Na

Figura 12 encontra-se um exemplo de reposição de água de irrigação nos tratamentos irrigados no dia 3 de outubro de 2012. Nessa data, foi aplicada uma lâmina de 280 kg de água nos lisímetros doo tratamento irrigado por pivô central (23 mm) e duas lâminas de 30 kg nos do tratamento irrigado por gotejamento (total de 5 mm). Pode ser observado que as lâminas aplicadas elevaram o armazenamento de água no solo nos dois tratamentos. Nessa data, além da diferença de armazenamento de água do início ao término do dia, a determinação de ET utilizando a eq. 1 teve a inclusão dos valores de irrigação.

Em função da maneira em que a água é aplicada nos diferentes métodos de irrigação, os valores de ET nos tratamentos irrigados foram diferentes no dia posterior (Figuras 14 e 15). Pode ser observado na Figura 13 que os maiores valores de ET horária foram encontrados no tratamento irrigado por pivô central, seguido dos tratamentos irrigados por gotejamento e sem irrigação. Isso é explicado pelo fato de que a aplicação de água por pivô central é realizada em toda a superfície do solo, fazendo com que as taxas de E sejam altas no dia posterior à irrigação, diferentemente do método por gotejamento, em que a aplicação é realizada de maneira localizada as plantas.

A demonstração da ET horária acumulada permite visualizar as diferenças nas taxas de ET entre os tratamentos, sendo que ET foi predominantemente maior no tratamento irrigado por pivô central em relação aos demais tratamentos (Figura 14). Enquanto ET do tratamento irrigado por pivô central ficou com valores de ET acumulada diária cerca 5 mm dia^{-1} , os tratamentos irrigados por gotejamento e sem irrigação ficaram em torno de 3 e 2 mm dia^{-1} , respectivamente. Apesar da elevada quantidade de dados obtidos nesse trabalho, vale ressaltar a importância da análise diária dos valores de armazenamento de água no solo de cada lisímetro dos tratamentos. Quando realizada de maneira precisa e detalhada, a análise permite observar e excluir de erros, realizar o manejo de irrigação adequadamente e verificar possíveis falhas no sistema.

Apesar da elevada quantidade de dados obtidos nesse trabalho, a análise diária dos valores de armazenamento de água no solo de cada lisímetro dos tratamentos é extremamente fundamental. Quando realizada de maneira precisa e detalhada, a análise permite observar e excluir de erros, realizar o manejo de irrigação adequadamente e verificar possíveis falhas no sistema.

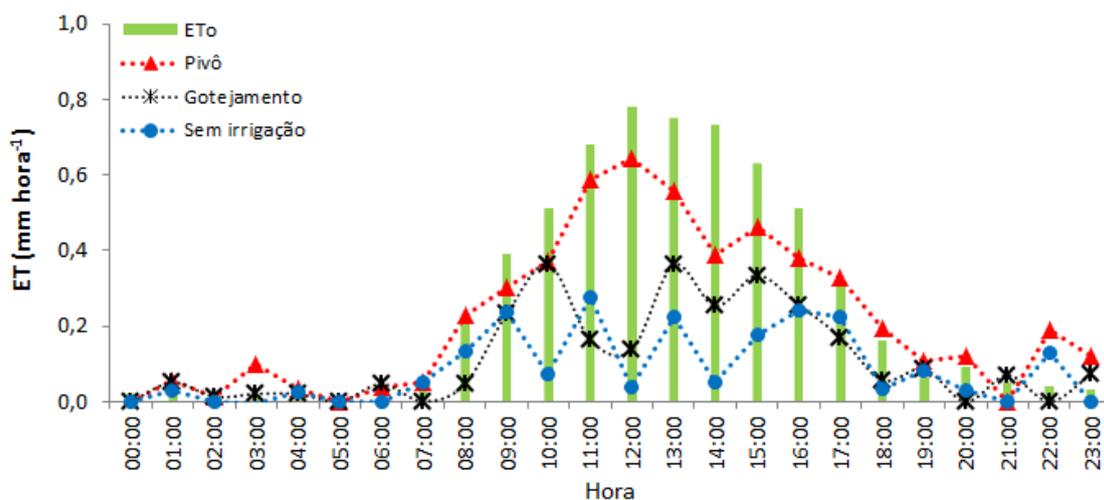


Figura 13 – Evapotranspiração horária (ET, mm hora⁻¹) e evapotranspiração de referência horária (ETo mm hora⁻¹) no dia subsequente a irrigação dos tratamentos irrigados e sem irrigação no dia 4 de outubro de 2012

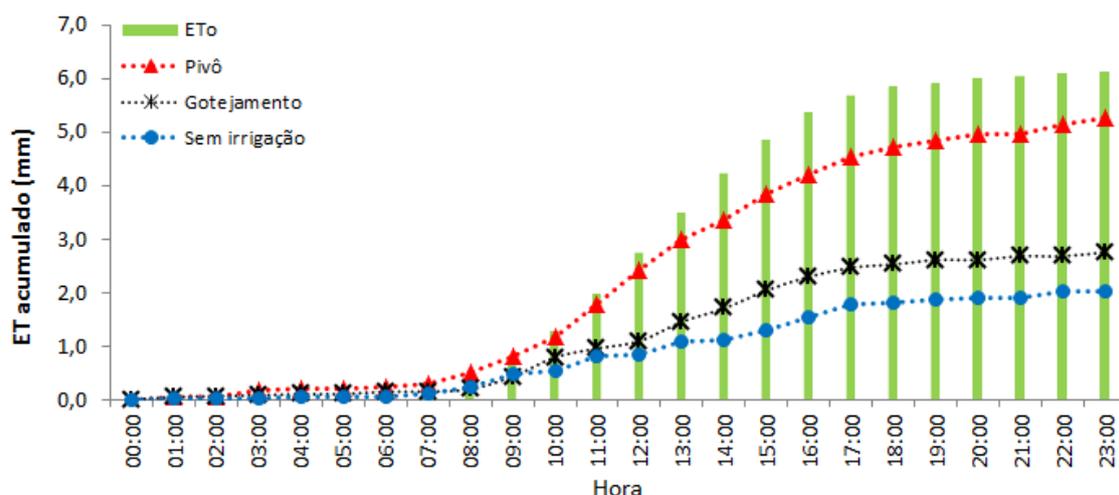


Figura 14 – Evapotranspiração horária acumulada (ET, mm) e evapotranspiração de referência horária acumulada (ETo, mm) no dia subsequente a irrigação dos tratamentos irrigados e sem irrigação no dia 4 de outubro de 2012

2.3.1.3 Armazenamento de água no solo

Os resultados do armazenamento de água no solo dos tratamentos irrigados por pivô central, gotejamento e sem irrigação durante os meses de março de 2012 a abril de 2013 mostrou um grande volume e uma boa distribuição da precipitação em dois períodos, fazendo com que os valores de armazenamento de água no solo dos tratamentos ficassem muito próximos entre si (Figura 15). Isto transcorreu de março a junho de 2012 e de novembro de 2012 a abril de 2013. Nessas ocasiões, devido ao solo encontrar-se em condições hídricas adequadas as plantas, praticamente não foram realizadas irrigações. Além disso, como os

meses que se sucederam ao transplântio foram caracterizados por uma boa condição hídrica, não foi possível realizar a diferenciação dos tratamentos no primeiro semestre.

Os valores de armazenamento de água no solo dos tratamentos irrigados ficaram com umidade abaixo da capacidade de campo entre julho e setembro de 2012 (Figura 15). Nesse período ocorreram problemas de funcionamento nos sistemas de irrigação do experimento. Problemas na parte elétrica da bomba de irrigação demandou sua substituição. A demora no processo de compra causou suspensão da irrigação no tratamento irrigado por gotejamento até o início de setembro. Devido à substituição do pivô central antigo por um novo (marca Irrigabras), as plantas desse tratamento também ficaram impossibilitadas de receber irrigações por mais de três meses, fazendo com que o armazenamento de água no solo ficasse muito baixo e, em alguns momentos, coincidiu e ficou abaixo da linha do PMP (meados de setembro e outubro de 2012). Na literatura entende-se que a determinação da evapotranspiração máxima da cultura só acontece quando as plantas se encontram em condições ótimas de desenvolvimento, ou seja, sem restrições hídricas e de nutrientes, sem doenças, pragas ou ervas daninhas (ALLEN et al., 1998). Assim, entendeu-se que os valores de evapotranspiração nesse período não fossem considerados o máximo da cultura, fazendo com que os dados fossem excluídos da determinação do coeficiente de cultivo.

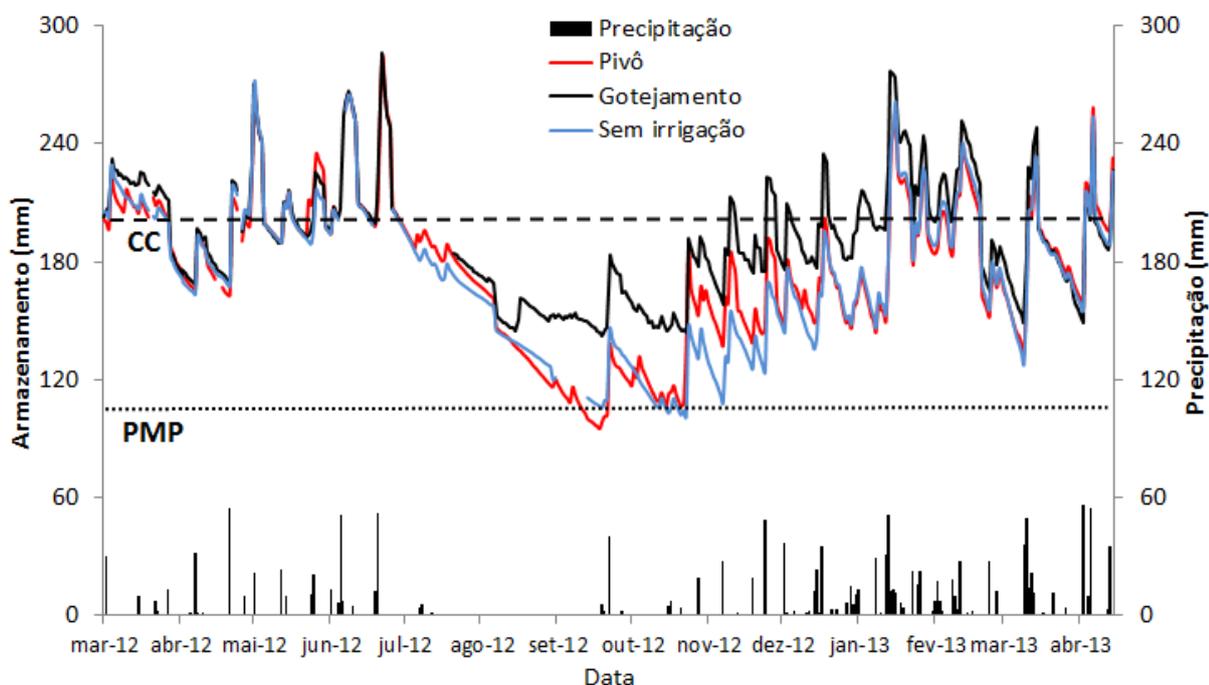


Figura 15 – Armazenamento de água no solo diário dos tratamentos irrigados por pivô central, gotejamento e sem irrigação, e precipitação (ambos em mm) durante os meses de março de 2012 a abril de 2013 em Piracicaba, SP

Nos períodos em que ocorreram grandes volumes de precipitações o armazenamento de água no solo ficou próximo à CC ou até mesmo acima dela (Figura 15). Com isso, foi necessário realizar constantes aberturas dos registros dos reservatórios de drenagem, pois ocorria a saturação do solo devido a intensidade da chuva nesses meses, enchendo os reservatórios de água de drenagem rapidamente. Em muitos desses casos a capacidade dos reservatórios era extrapolada, caracterizada pela saída de água pelos respiros dos mesmos. De maneira geral, o armazenamento de água no solo nos tratamentos subia quando ocorria precipitação ou irrigação e descia quando ocorria drenagem.

2.3.1.4 Evapotranspiração e coeficiente de cultivo simples

Além dos problemas encontrados nos sistemas de irrigação, foi observada no período de 20 de junho a 20 de julho de 2012 uma grande infestação de ervas daninhas em todo o experimento, fazendo com que os valores ET e Kc dos três tratamentos não fossem contabilizados (Figura 16 e Tabela 1). Apesar dos esforços para que a lavoura sempre estivesse livres de pragas e doenças, entre fevereiro e março de 2013 ocorreu grande infestação de fungos e pragas que prejudicaram o pleno desenvolvimento das plantas de pinhão-manso. Essa infestação causou danos às plantas, fazendo com que os valores de Kc fossem desconsiderados no mês de março de 2013.

Os valores de ET variaram de 1 a 5 mm dia⁻¹ nos tratamentos, sendo os mais elevados nos meses de novembro de 2012 a março de 2013 e mais baixos entre os meses de abril e setembro de 2012 (Figura 16). Os valores de ET diário tiveram tendência em acompanhar ETo durante todo o período, ou seja, os maiores e menores valores de ET coincidiram com o período de maior e menor demanda atmosférica, respectivamente. No entanto, ainda foram observados períodos em que ET diária estava com valores baixos enquanto ETo diária estava com valores altos (março, agosto e setembro de 2012).

Até o início de outubro de 2012 foram observados valores de ET médio dos três tratamentos normalmente abaixo de 3 mm dia⁻¹ (Figura 5), o que foi explicado devido ao porte baixo das plantas (Figuras 3) e as plantas estarem no período de estabelecimento. Conforme a demanda atmosférica foi aumentando (novembro de 2012 a meados de março de 2013) e as plantas estavam com maior altura (Figura 3) os valores de ET ficaram em torno de 4 mm dia⁻¹. Além disso, nota-se que neste período ET medida em todos os tratamentos passou a apresentar estreito acoplamento com as estimadas de ETo, evidenciando a forte correlação entre essas variáveis. Por fim, ressalta-se que nessa época as plantas começaram a produzir

frutos, o que demandou, indiretamente, maior quantidade de água em função do acelerado crescimento vegetativo.

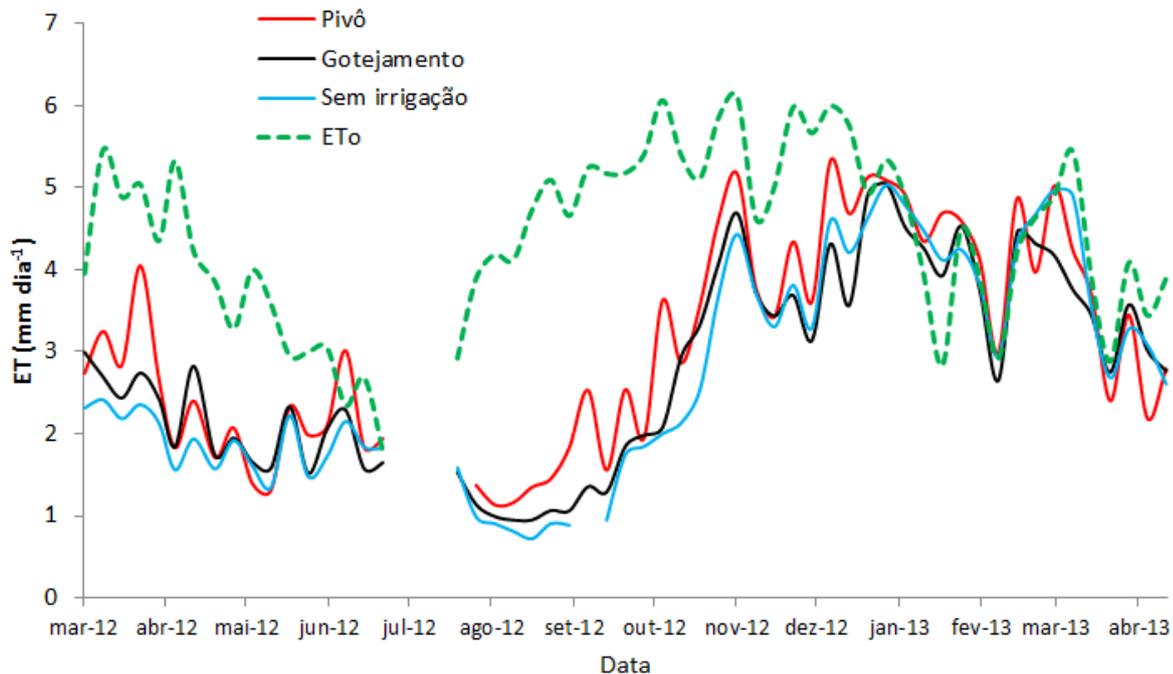


Figura 16 – Média semanal da evapotranspiração e evapotranspiração de referência (ambos em mm dia^{-1}) dos tratamentos irrigados por pivô central, gotejamento e sem irrigação da cultura de pinhão-manso durante os meses de março de 2012 a abril de 2013 em Piracicaba, SP

A comparação dos valores de ET entre os tratamentos foi realizada somente a partir de agosto 2012 devido à diferenciação dos tratamentos (utilização da irrigação), com exceção de alguns dias durante o mês de março. Nesse mês os valores de ET médio do tratamento irrigado por pivô central foram cerca de $0,7 \text{ mm dia}^{-1}$ maiores em relação aos demais tratamentos devido a duas irrigações (Figura 16). A partir de setembro, foi observada ET diária maior no tratamento irrigado por pivô central, seguido dos tratamentos irrigado por gotejamento e sem irrigação. Essa diferenciação foi mais evidente nos meses de agosto a outubro de 2012, sendo que o tratamento irrigado por pivô central obteve valores cerca de 20 e 35% maiores em relação aos tratamentos irrigados por gotejamento e sem irrigação, respectivamente. A diferença de ET entre os tratamentos irrigados nesse período pode ser explicada pela característica do método de irrigação. Enquanto no método por pivô central a aplicação de água é realizada em toda a superfície do solo, no método por gotejamento aplica-se água de forma localizada. Isso faz com que as taxas de evaporação no tratamento irrigado por pivô central seja maior em relação ao gotejamento. Isso pode ser evidenciado na Figura 16, sendo que em setembro de 2012 ocorreram picos de ET no tratamento irrigado por pivô central em decorrência das irrigações.

Na Tabela 1 estão descritas as médias mensais de evapotranspiração dos três tratamentos, evapotranspiração de referência e coeficiente de cultivo dos tratamentos irrigados. Os maiores valores de ET foram observados no mês de dezembro de 2012 para o tratamento irrigado por pivô central (4,80 mm dia⁻¹) e no mês de janeiro de 2013 para os tratamentos irrigados por gotejamento e sem irrigação (4,51 e 4,50 mm dia⁻¹, respectivamente). Em contrapartida, os menores valores de ET foram observados no mês de agosto de 2012 em todos os tratamentos (1,31, 1,02 e 0,84 mm dia⁻¹ para pivô central, gotejamento e sem irrigação, respectivamente).

Tabela 1– Evapotranspiração (ET, mm dia⁻¹), evapotranspiração de referência (ETo, mm dia⁻¹), coeficiente de cultivo (Kc, adimensional) dos tratamentos irrigados por pivô central (Piv), gotejamento (Got), e sem irrigação (Seq) da cultura de pinhão-manso durante os meses de março de 2012 a abril de 2013

| Data | ET | | | ETo | Kc | |
|--------|----------------------|------|------|------|--------------|------|
| | Piv | Got | Seq | | Piv | Got |
| | mm dia ⁻¹ | | | | adimensional | |
| Mar/12 | 2,99 | 2,34 | 2,03 | 5,01 | 0,57 | 0,48 |
| Abr/12 | 2,00 | 1,92 | 1,77 | 4,51 | 0,47 | 0,42 |
| Mai/12 | 1,64 | 1,66 | 1,43 | 3,57 | 0,50 | 0,50 |
| Jun/12 | 2,03 | 2,02 | 2,00 | 3,05 | 0,68 | 0,68 |
| Jul/12 | - | - | - | 3,55 | - | - |
| Ago/12 | 1,31 | 1,02 | 0,84 | 4,67 | - | - |
| Set/12 | 1,70 | 1,39 | 1,13 | 5,23 | 0,38 | 0,26 |
| Out/12 | 3,94 | 3,05 | 2,55 | 5,58 | 0,79 | 0,57 |
| Nov/12 | 3,61 | 3,40 | 3,30 | 5,75 | 0,71 | 0,66 |
| Dez/12 | 4,80 | 4,20 | 4,32 | 5,47 | 0,93 | 0,78 |
| Jan/13 | 4,71 | 4,51 | 4,50 | 4,17 | 1,07 | 1,02 |
| Fev/13 | 4,58 | 4,22 | 4,29 | 4,22 | 1,02 | 0,90 |
| Mar/13 | 3,52 | 3,52 | 3,66 | 4,28 | - | - |
| Abr/13 | 3,90 | 3,54 | 3,68 | 4,19 | 0,81 | 0,84 |

Os valores de Kc diário variaram de 0,3 a 1 nos tratamentos, coincidindo com os períodos de menor e maior demanda atmosférica, respectivamente (Tabela 1). Devido ao fato do Kc ser obtido pela razão entre ET da cultura e ETo, a proporção na diferença dos valores de Kc entre os tratamentos irrigados é mesma quando se comparado aos valores de ET da cultura. Foi observado que houve a mesma semelhança dos valores de Kc em relação ao ET da cultura no primeiro semestre de 2012, pois não foi possível ser realizada a diferenciação entre os tratamentos. Isso pode ser observado na Tabela 1, em que as médias mensais foram muito parecidas entre os tratamentos, com exceção ao período compreendido entre os dias 1º

a 30 de março, em que os valores de Kc do tratamento irrigado por pivô central foram maiores do que do tratamento irrigado por gotejamento (Kc 0,57 e 0,48, respectivamente).

A partir do momento em que ocorreu a diferenciação entre os tratamentos (entre setembro e outubro de 2012), caracterizada pelas irrigações, foi observada maior diferença nos valores de Kc entre os tratamentos (Figura 17 e Tabela 1). Os valores de Kc do tratamento irrigado por pivô central nos meses de setembro e outubro de 2012 foram, respectivamente, 32 e 29% maiores do que os valores do tratamento irrigado por gotejamento. Isto pode ser explicado, em partes, devido ao fato de que o método de irrigação utilizado influencia na eficiência do uso da água pelas plantas. A diferença entre os métodos de irrigação utilizados está na forma de aplicação de água às plantas. No tratamento irrigado por pivô central a água é distribuída em toda a área, molhando toda a superfície da mesma. Ao se comparar ao tratamento por gotejamento, uma vez que a irrigação é localizada, ou seja, a água é disponibilizada às plantas de forma localizada (formando o bulbo molhado), o efeito de evaporação encontrado nesse método de irrigação é muito menor. Com isso, ocorre que a quantidade de ET diária da cultura é menor no tratamento irrigado por gotejamento em relação ao irrigado por pivô central.

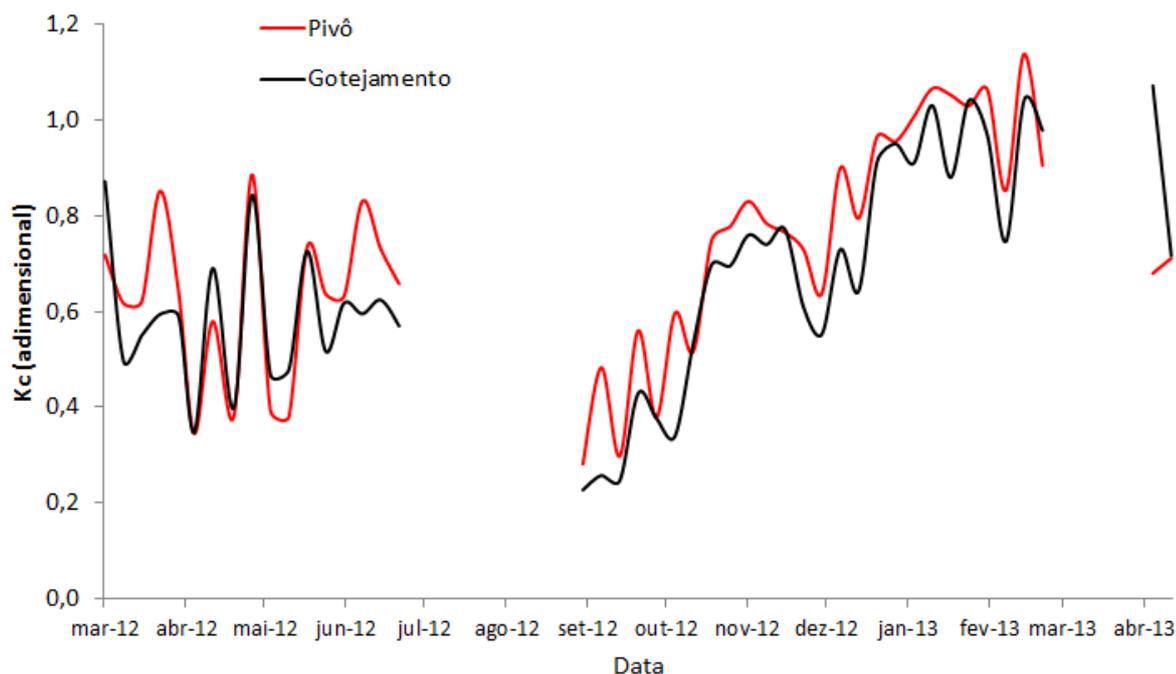


Figura 17 – Coeficiente de cultivo (Kc) dos tratamentos irrigados por gotejamento e pivô central da cultura de pinhão-mansão durante os meses março de 2012 a abril de 2013 em Piracicaba, SP

Os maiores valores de Kc foram observados em janeiro de 2013 (1,07 e 1,02 para pivô central e gotejamento, respectivamente) e os menores em setembro de 2012 (0,38 e 0,26 para pivô central e gotejamento, respectivamente).

2.3.1.5 Síntese dos valores de evapotranspiração e coeficiente de cultivo simples

Em função da grande quantidade de dados e dos inúmeros fatores que influenciam os valores de ET e Kc diariamente da cultura de pinhão-manso, foi verificado a necessidade de criar uma síntese desses componentes. Para facilitar a compreensão dos dados, esses foram divididos em 3 períodos: primeiros meses de desenvolvimento, período médio e primeira fase reprodutiva. Assim, foram considerados os dados de março de 2012 a fevereiro de 2013.

Nos primeiros meses de desenvolvimento das plantas (de março a maio de 2012) as médias de ET para os tratamentos irrigados por pivô central, gotejamento e sem irrigação foram 2,37, 2,15 e 1,87 mm dia⁻¹, respectivamente. O maior valor de ET do tratamento irrigado por pivô central foi devido às duas irrigações realizadas nesse período. Os valores de Kc nesse mesmo período foi de 0,58 e 0,54 nos tratamentos irrigados por pivô central e gotejamento, respectivamente.

No período médio (entre os meses de junho a agosto de 2013), caracterizado pela queda das folhas do pinhão-manso, as médias de ET dos tratamentos irrigados por pivô central, gotejamento e sem irrigação foram 1,47, 1,18 e 1,06 mm dia⁻¹, respectivamente. Esses valores foram praticamente a metade dos valores encontrados no início do desenvolvimento. Assim, Kc foi maior para o tratamento irrigado por pivô central (0,37) e menor para o tratamento por gotejamento (0,31).

Na primeira fase reprodutiva (de setembro de 2012 a fevereiro de 2013) foi observada a maior diferença dos valores médios de ET do tratamento irrigado por pivô central (3,38 mm dia⁻¹) em relação aos demais tratamentos (2,90 mm dia⁻¹ em ambos os tratamentos). Valores de Kc nesse período foram de 0,87 e 0,79 nos tratamentos irrigados por pivô central e gotejamento, respectivamente. A fase reprodutiva foi caracterizada pelos maiores valores de ET e Kc encontrados durante os 12 primeiros meses de avaliação.

A média anual de ET foi de 3,16, 2,77 e 2,74 mm dia⁻¹ dos tratamentos irrigados por pivô central, gotejamento e sem irrigação, respectivamente. O valor médio anual de Kc dos tratamentos irrigados por pivô central e gotejamento foi 0,67 e 0,60, respectivamente.

2.3.2 Evaporação, transpiração e coeficiente de cultivo dual

2.3.2.1 Análise do microlisímetro utilizado

Os resultados da evaporação nos tratamentos para avaliar a influência da evaporação do ML com dois diferentes diâmetros do envoltório externo está descrito na Tabela 2. A comparação entre a umidade do solo dos ML instalados dentro e fora do lisímetro encontra-se na Tabela 3.

Conforme demonstrado na Tabela 2, a avaliação da utilização do envoltório externo com um diâmetro menor em relação aos utilizados nas Séries desse trabalho demonstrou que não houve diferença significativa entre os valores de evaporação dos ML nos quatro dias de avaliação. Com isso, pode-se afirmar que os valores de evaporação coletados nas cinco Séries não sofreram influência quando foram avaliadas com diâmetro do envoltório externo maior. A maior diferença de evaporação foi observada no dia 20 de abril, sendo somente 0,22 mm dia⁻¹, valor esse considerado muito baixo quando considerado uma ET diária da cultura.

Tabela 2 – Comparação da evaporação utilizando microlisímetro de pesagem com dois diferentes diâmetros de envoltório externo

| Diâmetro envoltório externo | Evaporação mm dia ⁻¹ | | | |
|-----------------------------------|------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | 19-04-13 | 20-04-13 | 21-04-13 | 22-04-13 |
| 120 mm | 3,00 ^a | 2,21 ^a | 1,90 ^a | 1,92 ^a |
| 150 mm | 2,95 ^a | 1,99 ^a | 1,96 ^a | 1,88 ^a |

Nota – médias seguidas da mesma letra na vertical não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de propabilidade

A análise de variância da umidade do solo dos ML instalados dentro e fora dos lisímetros demonstraram que não houve diferença significativa entre as valores nas duas séries analisadas, com exceção ao tratamento irrigado por gotejamento na Série 1. Embora as médias de umidade tenham sido predominantemente maiores nos ML instalados fora do lisímetro na Série 1, na Série 2 essa média foi maior para os ML instalados dentro do lisímetro, com exceção ao tratamento sem irrigação (Tabela 3). Esses valores possibilitam afirmar que a evaporação dentro do solo do lisímetro está muito próxima às encontradas ao redor dele. Associado a isso e levando em consideração a maior facilidade de instalar os ML dentro do solo do lisímetro, padronizou-se a instalação dos ML somente dentro do solo dos lisímetros nas demais Séries.

Tabela 3 – Umidade do solo com base em volume dos tratamentos irrigados por pivô central, gotejamento e sem irrigação no último dia de avaliação das Séries 1 e 2 do microlisímetro

| Data | Tratamento | Posição Coleta | Umidade solo (%) |
|---------|---------------|----------------|-------------------|
| Série 1 | Pivô | Dentro L | 16,6 ^a |
| | | Fora L | 18,3 ^a |
| | Gotejamento | Dentro L | 19,2 ^a |
| | | Fora L | 24,2 ^b |
| | Sem irrigação | Dentro L | 20,0 ^a |
| | | Fora L | 20,6 ^a |
| Série 2 | Pivô | Dentro L | 15,0 ^a |
| | | Fora L | 14,8 ^a |
| | Gotejamento | Dentro L | 23,4 ^a |
| | | Fora L | 19,0 ^a |
| | Sem irrigação | Dentro L | 18,6 ^a |
| | | Fora L | 18,8 ^a |

Nota – médias seguidas da mesma letra na vertical não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de propabilidade

2.3.2.2 Evaporação, transpiração e coeficiente de cultivo dual

Em função de problemas ocorridos em algumas séries, alguns valores foram excluídos dos cálculos. Esse procedimento foi realizado nas Séries 1 e 2 (Figuras 18 e 19). Além disso, devido a precipitação elevada que ocorreu no segundo dia de avaliação da Série 4, a avaliação de E e T foi realizada somente em um dia (Figura 21).

Na Série 1 os valores de evapotranspiração da cultura não puderam ser computados devido à grande incidência de plantas daninhas no experimento. Devido a isso, os valores utilizados foram somente os de E e Ke (Figura 18). Pode ser observado que o comportamento da E nos três tratamentos foram muito parecidos entre si durante os 5 dias de análise (Figura 18a, b e c). Isto é explicado pelo fato de que nesse período de análise os tratamentos irrigados estavam impossibilitados de receber a irrigação devido aos problemas nos sistemas de irrigação mencionados no item 5.1.3., fazendo com que o armazenamento de água no solo dos três tratamentos ficassem muito próximos entre si (Figura 15). Em decorrência da precipitação (1,5 mm) no dia 12 de julho, os valores de E nessa data foram os menores em relação aos demais dias. Além disso, nessa data foi observado uma grande quantidade de nuvens, fazendo com que a demanda atmosférica (ET_o) fosse menor o que condicionou a uma menor evaporação.

Os valores de Ke do tratamento irrigado por gotejamento e pivô central na Série 1 foram muito parecidos entre si durante os cinco dias de análise, com exceção ao terceiro dia (12 julho), em que houve uma diferença de Ke de 0,2 (Figura 18d e e). Isso foi devido à

evaporação no terceiro dia do tratamento irrigado por pivô central ser um pouco superior em relação ao irrigado por gotejamento.

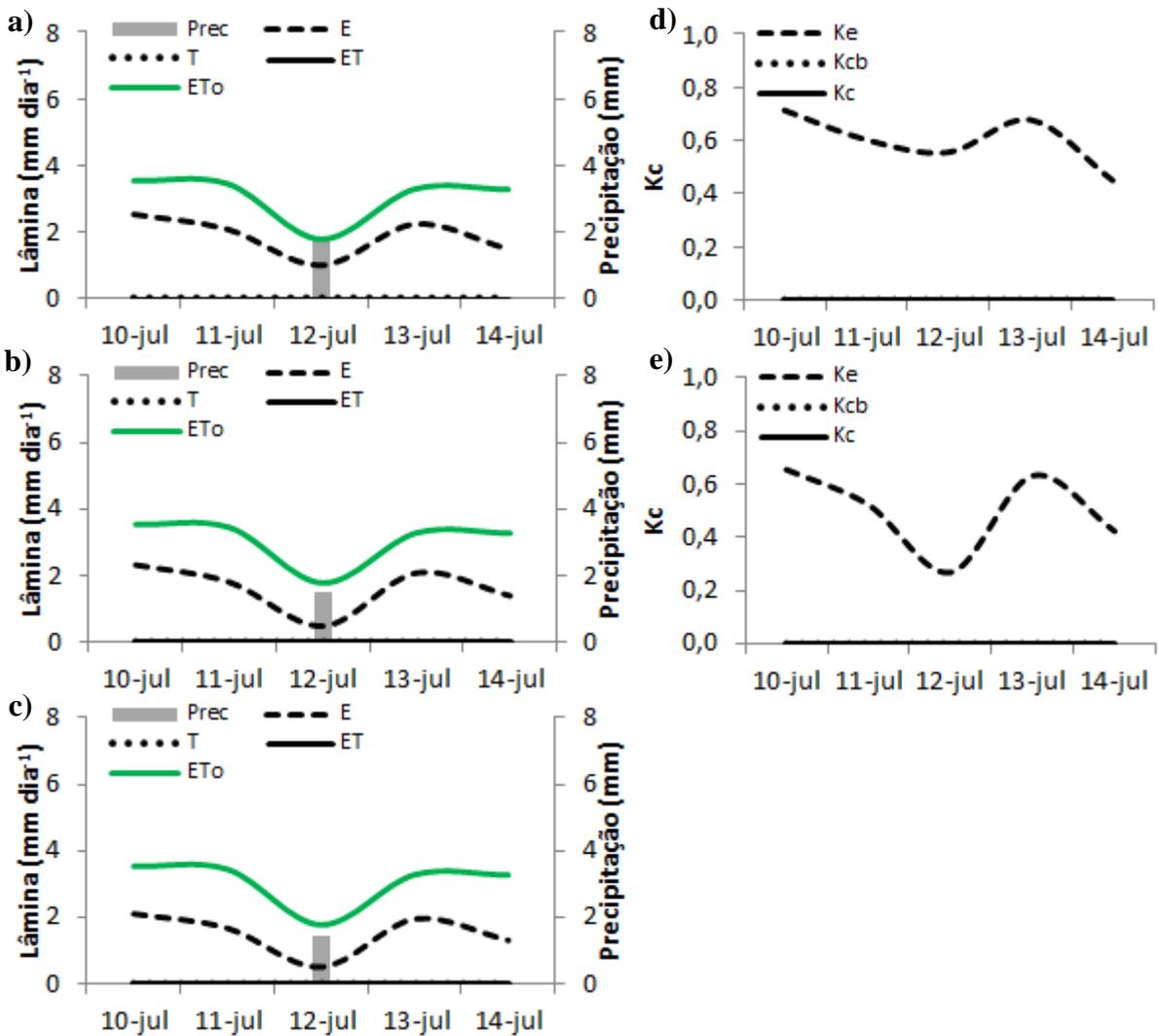


Figura 18 – Evapotranspiração (ET), evapotranspiração de referência (ETo), evaporação (E) e transpiração (T, todos em mm dia⁻¹) dos tratamentos irrigados por pivô central, (a), gotejamento (b) e sem irrigação (c) e; coeficiente de cultivo simples (Kc), coeficiente de evaporação (Ke) e coeficiente de cultivo basal (Kcb) dos tratamentos irrigados por pivô central (d) e gotejamento (e); da cultura de pinhão-mansô durante o período de 10 a 14 de julho de 2012 (Série 1)

Diferentemente da Série 1, na Série 2 não ocorreu precipitação durante os dias de avaliação dos componentes de ET separadamente (Figura 19). E foi maior no primeiro dia nos três tratamentos e decrescendo na sequência. Pode ser observado que os valores de E nos tratamentos irrigados foram um pouco superior em relação ao tratamento não irrigado, porém, essa variação não ultrapassou 0,4 mm. Os valores de T foram menores do que os valores de E em todos os dias, sendo observada uma diferença mais acentuada entre esses componentes no tratamento irrigado por pivô central (Figura 19a, b e c).

Devido ao fato dos valores de K_e e K_{cb} serem gerados em função da E_{To} em ambos os casos, a proporção na diferença desses componentes foram as mesmas em relação a E e T , respectivamente. Pode ser observado na Figura 19d e e que os valores de K_e tiveram um comportamento muito parecidos entre os tratamentos e que ocorreu um decréscimo contínuo nos valores do primeiro para o último dia de análise.

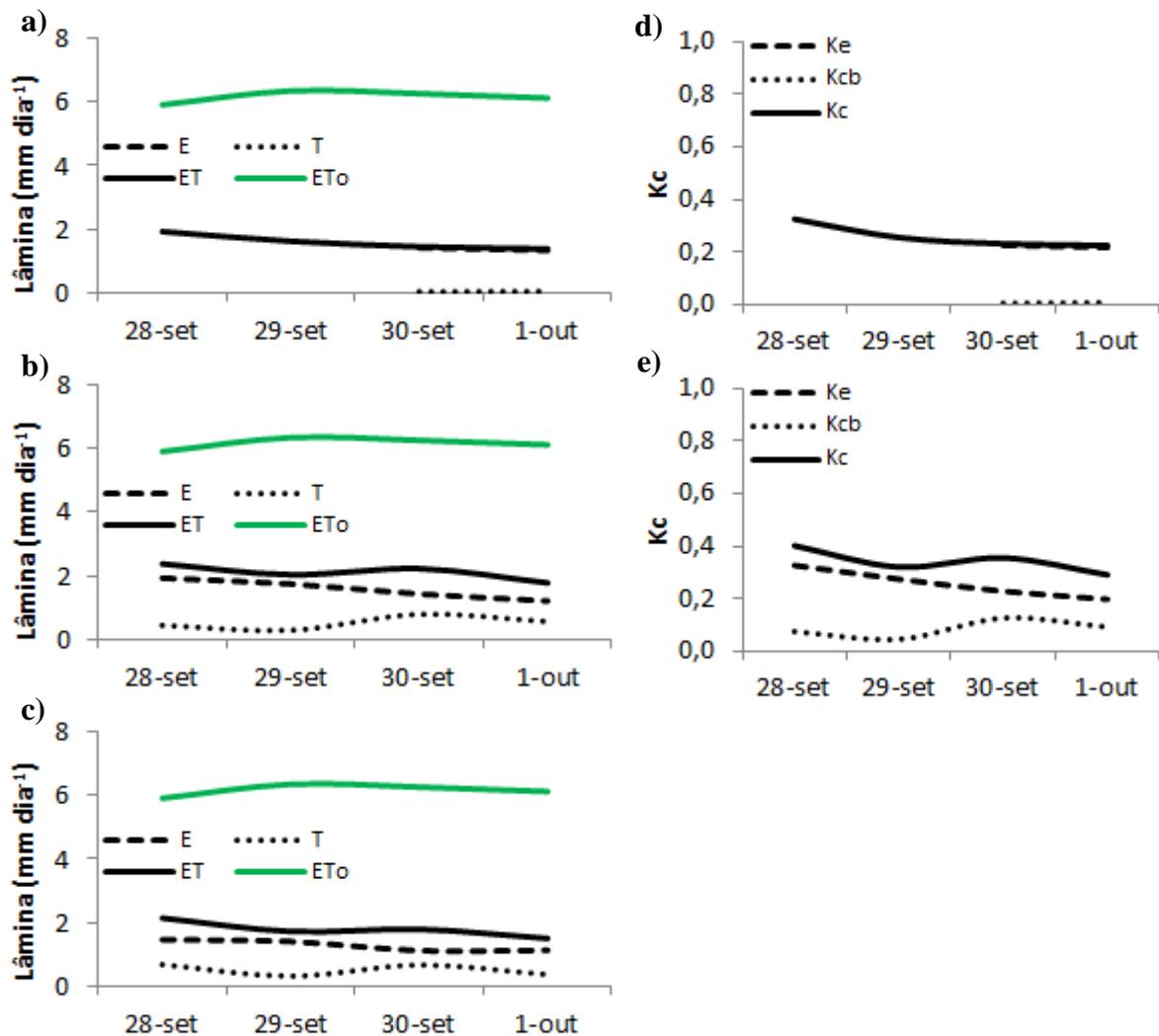


Figura 19 – Evapotranspiração (ET), evapotranspiração de referência (E_{To}), evaporação (E) e transpiração (T, todos em mm dia^{-1}) dos tratamentos irrigados por pivô central, (a), gotejamento (b) e sem irrigação (c) e; coeficiente de cultivo simples (Kc), coeficiente de evaporação (K_e) e coeficiente de cultivo basal (K_{cb}) dos tratamentos irrigados por pivô central (d) e gotejamento (e); da cultura de pinhão-manso durante o período de 28 de setembro a 1º de outubro de 2012 (Série 2)

A avaliação da Série 3 foi caracterizada por valores de E maiores no primeiro dia e seguido de um comportamento decrescente ao passar dos dias. Enquanto os valores de E nos três tratamentos variaram na faixa de 1,2 a 2,4 mm dia^{-1} , os valores de T nos três tratamentos variaram de 1 a 2,3 mm dia^{-1} (Figura 20a, b e c) com exceção ao tratamento irrigado por gotejamento, em que foi observado um comportamento de T mais estável, valores de T dos

demais tratamentos variaram nos três dias de coleta. Em nenhum dos dias os valores de T no tratamento irrigado por gotejamento foram maiores que E. Isso pode ser explicado devido os ML terem sido instalados na linha do gotejador, o que fizeram com que os valores de E se sobressaíssem em relação aos de T.

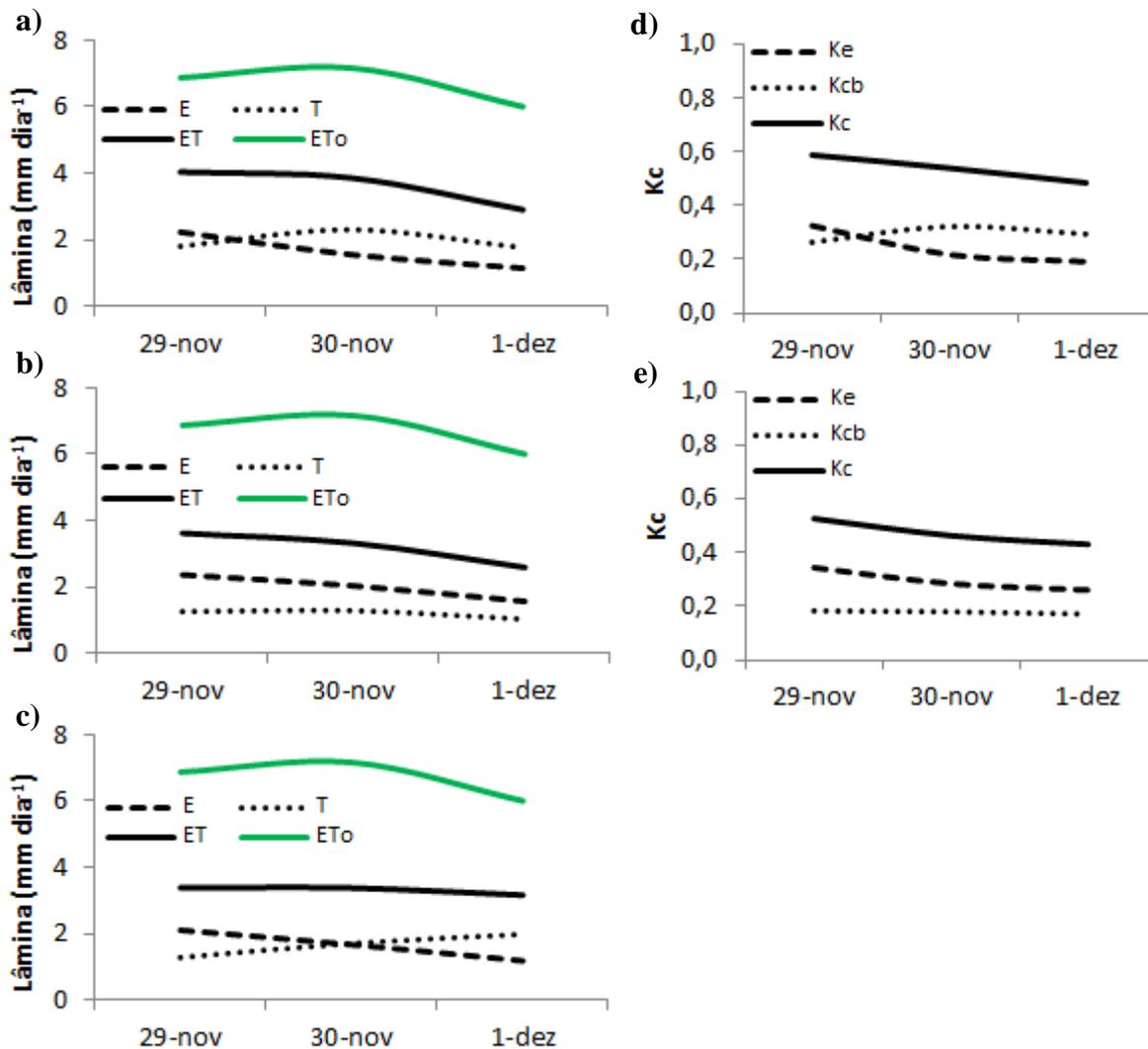


Figura 20 – Evapotranspiração (ET), evapotranspiração de referência (ETo), evaporação (E) e transpiração (T, todos em mm dia⁻¹) dos tratamentos irrigados por pivô central, (a), gotejamento (b) e sem irrigação (c) e; coeficiente de cultivo simples (Kc), coeficiente de evaporação (Ke) e coeficiente de cultivo basal (Kcb) dos tratamentos irrigados por pivô central (d) e gotejamento (e); da cultura de pinhão-manso durante o período de 29 de novembro a 1º de dezembro de 2012. (Série 3)

Os valores de Ke, com exceção ao primeiro dia, foram menores aos de Kcb no tratamento irrigado por pivô central durante o período analisado na Série 3 (Figura 20d). Esses foram opostos em relação ao tratamento irrigado por gotejamento, sendo que Ke sempre superiores aos de Kcb (Figura 20e). Os valores de Ke e Kcb variaram, respectivamente, de 0,20 a 0,34 e de 0,17 a 0,30 durante a avaliação.

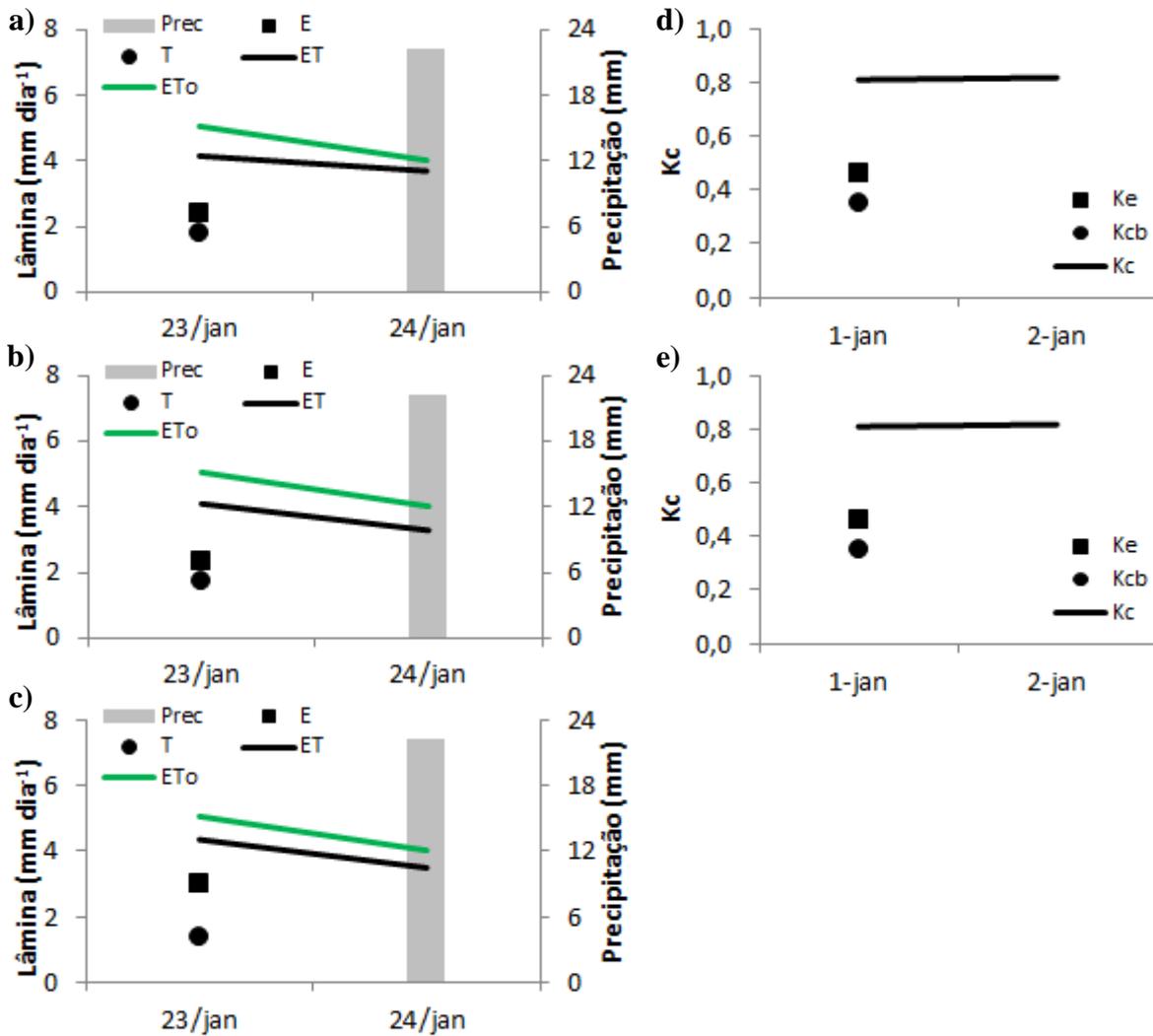


Figura 21 – Evapotranspiração (ET), evapotranspiração de referência (ETo), evaporação (E) e transpiração (T, todos em mm dia⁻¹) dos tratamentos irrigados por pivô central, (a), gotejamento (b) e sem irrigação (c) e; coeficiente de cultivo simples (Kc), coeficiente de evaporação (Ke) e coeficiente de cultivo basal (Kcb) dos tratamentos irrigados por pivô central (d) e gotejamento (e); da cultura de pinhão-mansão durante o período de 23 e 24 de janeiro de 2013 (Série 4)

Em função da precipitação ocorrida no segundo dia de avaliação da Série 4, não foi possível realizar a continuação da série. Como a precipitação nesse dia foi em torno de 20, o solo do ML ficou saturado, impossibilitando a coleta de dados no período (Figura 21). Diferentemente do ocorrido na Série 1, em que a precipitação (1,5 mm) não saturou o solo do ML e permitiu a continuidade da avaliação (Figura 18). A tomada de decisão para realizar uma série de ML foi realizada conforme a probabilidade de não ocorrência de chuva. No caso das Séries 1 e 3 a previsão semanal era 0% de probabilidade de chuva, porém, isso não se confirmou. É sabido que no período da Série 3 (dezembro a fevereiro) o clima é muito instável, fazendo com que a tomada de decisão para realizar uma série de ML seja de alto

risco. Portanto, perante aos fatos ocorridos, foi possível a coleta de dados de somente um dia na Série 4.

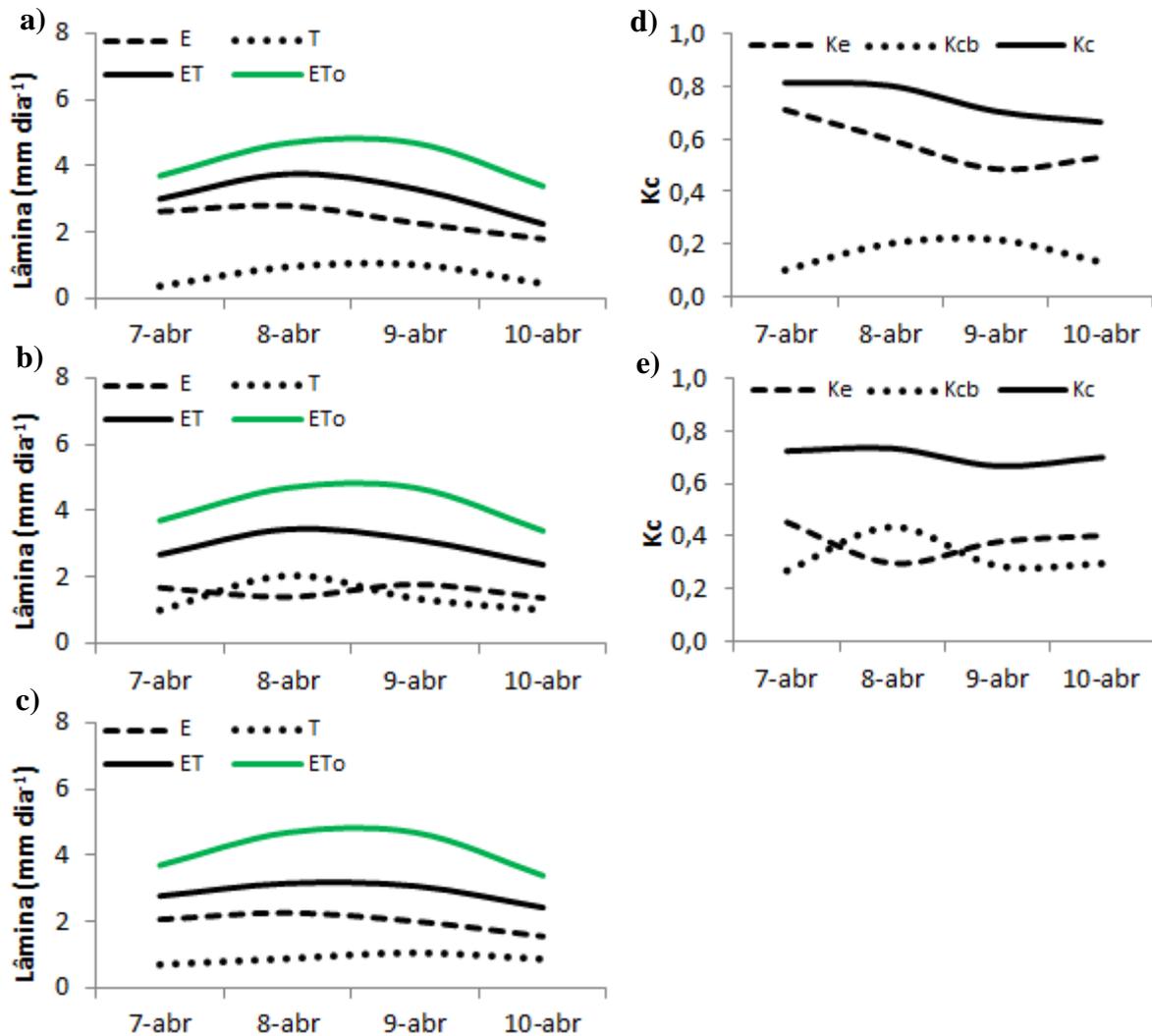


Figura 22 – Evapotranspiração (ET), evapotranspiração de referência (ETo), evaporação (E) e transpiração (T, todos em mm dia^{-1}) dos tratamentos irrigados por pivô central, (a), gotejamento (b) e sem irrigação (c) e; coeficiente de cultivo simples (Kc), coeficiente de evaporação (Ke) e coeficiente de cultivo basal (Kcb) dos tratamentos irrigados por pivô central (d) e gotejamento (e); da cultura de pinhão-mansão durante o período de 7 a 10 de abril de 2013 (Série 5)

Pode ser observado uma semelhança dos valores de E e T entre os tratamentos irrigados na Série 4 (Figura 21a e b). Além disso, a diferença entre os valores de E e T dos tratamentos irrigados foi praticamente a mesma entre eles, sendo E cerca de $0,8 \text{ mm dia}^{-1}$ maior que T na Série 4. Maior diferença entre os componentes foi encontrada no tratamento sob sem irrigação, sendo que os valores de E foram o dobro maior que os de T (sendo E cerca de 2 mm dia^{-1} maior) (Figura 21 c). Em relação ao Kc dual, pode ser observado que Ke e Kcb ficaram em torno de 0,5 e 0,3, respectivamente, em ambos os tratamentos (Figura 21d e e).

Devido a não continuidade da avaliação na Série 4, não foi possível realizar uma análise mais aprofundada nesse período.

Na avaliação da evaporação na Série 5 pode ser observado um comportamento muito parecido nos valores de E, T e ET entre os tratamentos irrigados por pivô central e sem irrigação (Figura 22a, b e c). Nesses tratamentos os valores de E foram predominantemente maiores que T, sendo que E variou de 2 a 3 mm dia⁻¹ e T de 0,1 a 1 mm dia⁻¹. Com exceção no segundo dia de avaliação, os valores de E do tratamento irrigado por gotejamento também foram maiores que T. Porém, a diferença entre eles foram menores em relação aos demais tratamentos, sendo que a variação máxima foi de 0,7 mm dia⁻¹.

Na Série 5 os valores de Ke no tratamento irrigado no pivô central foram superiores aos do tratamento irrigado por gotejamento (Figuras 22d e e). Uma análise de todas as séries permite observar que a proporção dos valores de Ke e Kcb encontrados na Série 5 foi maior em relação a mesma proporção das demais séries. Enquanto nas demais séries a proporção média foi no máximo 20%, na Série 5 a proporção média foi de 35%. De maneira geral, os valores de Ke foram superiores aos de Kcb, com exceção ao segundo dia de avaliação no tratamento irrigado por gotejamento.

2.3.2.3 Síntese dos valores de evaporação, transpiração e coeficiente de cultivo dual

Os valores de E, T, Ke e Kcb coletados com ML de pesagem tiveram um comportamento muito semelhante nos tratamentos nas cinco avaliações. As taxas de E e Ke foram, na maioria dos casos, superiores aos de T e Kcb.

Enquanto os valores médios de E em todas as séries variaram de 1,42 a 2,57 mm dia⁻¹, as médias de T variaram de 0,42 a 1,68 mm dia⁻¹. Em nenhuma das avaliações as médias de E em cada série foi inferior às médias de T. Com relação ao coeficiente de cultivo dual, os valores médios de Ke e Kcb variaram de 0,26 a 0,58 e de 0,06 a 0,35, respectivamente.

Esses valores comprovam que, devido ao fato das plantas estarem com altura baixa, os valores de E e Ke se sobressaíram aos de T e Kcb. Conforme a planta for se desenvolvendo, aumentando a altura e o número de folhas e, conseqüentemente, sombreando a superfície do solo, os valores de T e Kcb deverão se sobressair em relação aos de T e Kcb.

3 CONCLUSÕES

1. As médias dos tratamentos durante o primeiro ano foram 3,17, 2,82 e 2,82 mm dia⁻¹ para os tratamentos irrigado por pivô central, irrigado por gotejamento e sem irrigação, respectivamente.
2. A média do período de Kc foi 0,69 e 0,63 para os tratamentos irrigados por pivô central e gotejamento
3. Os valores de ET no tratamento irrigado por pivô central foi cerca de 10% maiores do que os demais tratamentos. Essa mesma proporção foi encontrada para os valores de Kc entre os tratamentos irrigados por pivô central e gotejamento.
4. Os valores de E, T, Ke e Kcb variaram, principalmente, em função do desenvolvimento da cultura e da demanda atmosférica.
5. Em todos os tratamentos a média geral de E e Ke foram 1,85 mm dia⁻¹ e 1,03, respectivamente, e as médias de T e Kcb foram 0,4 mm dia⁻¹ e 0,2, respectivamente..
6. Os valores de E e T representaram, respectivamente, em torno de 65 e 35% dos valores de ET nas séries avaliadas em todos os tratamentos. Essa mesma proporção foi encontrada nos valores de Ke e Kcb nos tratamentos irrigados.

REFERÊNCIAS

- _____. **REF-ET 2.0**: reference evapotranspiration calculation software. Kimberly, 2000. Disponível em: < <http://www.kimberly.uidaho.edu/ref-et/> >. Acesso em: 19 fev. 2007.
- ABOUKHALED, A.; ALFARO, A.; SMITH, M. **Lysimeters**. Rome: FAO, 1982. 68p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 39).
- ALBUQUERQUE, W.G.; AZEVEDO, C.A.V.; BELTRÃO, N.E.M; FREIRE, M.A.O; NASCIMENTO, J.V.R. Crescimento do pinhão-manso (*Jatropha curcas* L) em função de níveis de água e adubação nitrogenada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MAMONA, ENERGIA E RICINOQUÍMICA, 3., 2007. Salvador. **Anais...** Salvador, 2007. CD-ROM.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56).
- ALLEN, S. J. Measurement and estimation of evaporation from soil under sparse barley crops in Northern Syria. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 49, n. 4, p. 291-309, 1990.
- ALLEN. R.G.A Penman for all seasons. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 112, n. 4, p. 348-368, 1986.
- AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS – ENVIRONMENTAL AND WATER RESOURCES INSTITUTE. **The ASCE standardized reference evapotranspiration equation**. Reston: ASCE, 2005. 216p.
- ARRUDA, F.P.; BELTRÃO, N.E.M; ANDRADE, A. P.;PEREIRA, W. E.; SEVERINO, L. S. Cultivo de pinhão-manso (*Jatropha curca* L.) como alternativa para o semi-árido nordestino. **Revista Brasileira de Oleaginosas e Fibrosas**, Campina Grande, v. 8, n. 1, p. 789-799, jan-abr. 2004.
- BERNARDO, S.; SOARES, A.A.; MANTOVANI, E.C. **Manual de irrigação**. 7.ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2005. 611p.
- BOAST, C.W.; ROBERTSON, T.M. A “micro-lysimeter” method for determining evaporation from bare soil: Description and laboratory evaluation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 46, n. 4, p. 689-696, 1982.
- CARNIELLI, F. **O combustível do futuro**. Boletim Informativo N° 1413 - Ano 29. 2003. Disponível em: [www.ufmg.br/boletim/bul1413 /quarta.shtml](http://www.ufmg.br/boletim/bul1413/quarta.shtml). Acesso em: 23 abril 2008.
- CARVALHO, D.F. et al. Instalação, construção e funcionamento de um lisímetro de pesagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 2, p. 363-372, maio/ago. 2007.
- CENTRO DE PESQUISAS METEOROLÓGICAS E CLIMÁTICAS APLICADAS A AGRICULTURA. **Clima dos municípios paulistas**. Disponível em: <http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_436.html>. Acesso em: 16 nov. 2011.

CORTESÃO, M. **Culturas tropicais: plantas oleaginosas**. Lisboa: Clássica, 1956. 231p.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306p.

EVANGELISTA, A.W.P.; MELO, P.C.; OLIVEIRA, E.L.; FARIA, M.A. Produtividade e rendimento de sementes de pinhão-manso submetido à irrigação e adubação com OMM-TECH. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, n. 2, p. 315-323, mar./abr. 2011.

EVETT, S.R.; WARRICK, A.W.; MATTHIAS, A.D. Wall material and capping effects on microlysimeter temperatures and evaporation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 59, n. 2, p. 329-336, 1995.

FACT, F. THE JATROPHA HANDBOOK: From Cultivation to Application. JONGH, J. D. http://www.fact-foundation.com/media_en/FACT_Jatropha_Handbook_EN_2010_FULL:117 p. 2010.

FARIA, R.T.; CAMPECHE, F.S.M.; CHIBANA, E.Y. Construção e calibração de lisímetros de alta precisão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 1, p. 237-242, 2006.

FLUMIGNAN, D. L.; FARIA, R.T. LENA, B.P. Test of a microlysimeter for measurement of soil evaporation. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 32, n. 1, p. 80-90, jan/fev. 2012.

FLUMIGNAN, D.L. **Lisímetros de pesagem direta para o estudo do consumo hídrico do pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.)**. 200p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, SP, 2011.

FRANCO, D.A.S.; GABRIEL, D. Aspectos fitossanitários na cultura do pinhão-manso (*Jatropha curcas* L) para a produção de biodiesel. **Biológico**, São Paulo, v. 70, n. 2, p. 63-64, dez. 2008.

GONZÁLEZ-ALTOZANO, P.; PAVEL, E.W.; ONCINS, J.A.; DOLTRA, J.; COHEN, M.; PAÇO, T.; MASSAI, R.; CASTEL, J. R. Comparative assessment of five methods of determining sap flow in peach trees. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 95, n. 5, p. 503-515, 2008.

GUIMARÃES, A.S.; BELTRÃO, N.E.M. Crescimento inicial de *jatropha curcas* em função de fontes e doses de fertilizantes. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MAMONA, ENERGIA E RICINOQUÍMICA, 3., 2007.Salvador. **Anais...** Salvador, 2007. CD-ROM.

HEIFFIG, L.S. CÂMARA, G.M.S. **Potencial da cultura do pinhão-manso como fonte de matéria-prima para o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel**.In: CÂMARA, G. DE S; HEIFFIG, L.S(Org.). **Agronegócio de Plantas Oleaginosas: Matérias-Primas para Biodiesel**.Piracicaba-SP: ESALQ, v. 1, p. 105-121, 2006.

HOWELL, T.A.; McCORMICK, R.L.; PHENE, C.J. Design and installation of large weighing lysimeters. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, Saint Joseph, v. 28, n. 1, p. 106-117, 1985.

- KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. **Meteorologische Zeitschrift**, Berlin, v. 15, n. 3, p. 259-263, 2006.
- LASCANO, R.J.; SOJKA, R.E. **Irrigation of agricultural crops**. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy, 2007. 664p. (Agronomy Monograph, 30)
- LUÍS, R.M.F.C.B. **Respostas de *Jatropha curcas* L. ao déficit hídrico**. 2009. 62p. Dissertação (Mestrado Engenharia Agrônômica) – Instituto Superior de Agronomia, Lisboa, 2009.
- MAES, W.H.; ACHTEN, W.M.J.; REUBENS, B.; REAS, D.; SAMSON, R.; MUYS, B. Plant-water relationships and growth strategies of *Jatropha curcas* L, seedling under different levels of drought stress. **Journal of Arid Environments**, Zhangye, v. 73, n. 10, p. 877-884, 2009.
- OLIVEIRA, E.L.; FARIA, M.A.; EVANGELISTA, A.W.P.; MELO, P.C. Resposta do pinhão-mansão à aplicação de níveis de irrigação e doses de adubação potássica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 6, p. 593-598, 2012.
- OPENSHAW, K. A review of *Jatropha curcas*: an oil plant of unfulfilled promise. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 19, n. 1, p. 1-15, 2000.
- RAJAGOPAL, D. Implications of India's biofuel policies for food, water and the poor. **Water Policy**, London, v. 10, supplement 1, p. 95-106, 2008.
- RAO, A.V.R.K.; WANI, S.P.; SINGH, P.; SRINIVAS, K.; RAO, C.S. Water requirement and use by *Jatropha curcas* in a semi-arid tropical location. **Biomass and Bioenergy**, Miamisburg, v. 39, n. ?, p. 175-181, 2012.
- REICHARDT, K. **Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera**. 4. ed. Campinas: Fundação Cargill, 1985. 445 p.
- RITCHIE, J.T. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. **Water Resources Research**, Washington, v. 8, n. 5, p. 1204-1213, 1972.
- SALÉ, N.A.C. **Oportunidades e deságios para o comércio internacional de biocombustível de *Jatropha curcas* (Pinhão-mansão) produzido em países em desenvolvimento**. 139p. Dissertação (Mestrado em Agronegócio) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.
- SATURNINO, H.M, PACHECO, D.D; KAKIDA, J; TOMINAGA, N; GONÇALVES, N.P., **Cultura do Pinhão-mansão (*Jatropha curcas* L.). Informe Agropecuário, Produção de oleaginosas para biodiesel**, Belo Horizonte, v. 26, p. 44-78, 2005.
- SEVERINO, L. S.; VALE, L. S.; BELTRÃO, N. E. M. A simple method for measurement of *Jatropha curcas* leaf area. **Revista Brasileira de Oleaginosas e Fibrosas**, Campina Grande, v. 11, n. 1, p. 9-14, 2007.

SINCLAIR, T.R. Theoretical considerations in the description of evaporation and transpiration. In: STEWART, B.A.; NIELSEN, D.R. (Org.). **Irrigation of agricultural crops**. Madison: American Society of Agronomy, 1990. p. 343-361. (Agronomy, 30).

SMITH, D.M.; ALLEN, S.J. Measurement of sap flow in plant stems. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 47, n. 305, p. 1833-1844, 1996.

SMITH, M. **Rveport on the expert consultation on procedures for revision of FAO guidelines for prediction of crop water requirements**. Rome: FAO. 1991. 45 p.

SUTTERER, N. **Jatropha cultivation using treated sewage effluent – water requiriments and environmental risks**. 59p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade de Hohenheim, Hohenheim, 2010.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719 p.

TEWARI, D.N. **Jatropha and biodiesel**. New Delhi: Ocean Books, 2007. 228 p.

WALKER, G.K. Measurement of evaporation from soil beneath crop canopies. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 63, n. 1, p. 137-141, 1983.