

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP  
CÂMPUS JABOTICABAL**

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO E COEFICIENTE DE CULTURA DE  
MUDAS PRÉ-BROTADAS DE CANA-DE-AÇÚCAR PARA  
MANEJO DE IRRIGAÇÃO EM CULTIVO PROTEGIDO**

**Luís Guilherme Polizel Libardi**

Engenheiro Agrônomo

**2017**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP  
CÂMPUS JABOTICABAL**

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO E COEFICIENTE DE CULTURA DE  
MUDAS PRÉ-BROTADAS DE CANA-DE-AÇÚCAR PARA  
MANEJO DE IRRIGAÇÃO EM CULTIVO PROTEGIDO**

**Luís Guilherme Polizel Libardi**

**Orientador: Prof. Dr. Rogério Teixeira de Faria**

**Coorientador: Prof. Dr. Alexandre Barcellos Dalri**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Agronomia (Produção Vegetal)

**2017**

Libardi, Luís Guilherme Polizel  
L694e Evapotranspiração e coeficiente de cultura de mudas pré-brotadas  
de cana-de-açúcar para manejo de irrigação em cultivo protegido /  
Luís Guilherme Polizel Libardi. -- Jaboticabal, 2017  
x, 63 p. : il. ; 29 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista,  
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2017  
Orientador: Rogério Teixeira de Faria  
Coorientador: Alexandre Barcellos Dalri  
Banca examinadora: Glauco de Souza Rolim, Danilton Luiz  
Flumignan  
Bibliografia

1. Análise de Crescimento. 2. Lisímetro. 3. Necessidade Hídrica. I.  
Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 631.67:633.61

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação –  
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de Jaboticabal.

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: EVAPOTRANSPIRAÇÃO E COEFICIENTE DE CULTURA DE MUDAS PRÉ-BROTADAS DE CANA-DE-AÇÚCAR PARA MANEJO DE IRRIGAÇÃO EM CULTIVO PROTEGIDO**

**AUTOR: LUÍS GUILHERME POLIZEL LIBARDI**


**ORIENTADOR: ROGÉRIO TEIXEIRA DE FARIA**

**COORIENTADOR: ALEXANDRE BARCELLOS DALRI**

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em AGRONOMIA (PRODUÇÃO VEGETAL), pela Comissão Examinadora:

  
Prof. Dr. ROGÉRIO TEIXEIRA DE FARIA  
Departamento de Engenharia Rural / FCAV / UNESP - Jaboticabal

  
Prof. Dr. GLAUCO DE SOUZA ROLIM  
Departamento de Ciências Exatas / FCAV / UNESP - Jaboticabal

  
Prof. Dr. DANILTON LUIZ FLUMIGNAN - VIDEOCONFERÊNCIA  
Agropecuária Oeste / Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária / Dourados/MS

Jaboticabal, 08 de dezembro de 2017

## **DADOS CURRICULARES DO AUTOR**

**LUÍS GUILHERME POLIZEL LIBARDI** - Nascido dia 06 de maio de 1990, em Piracicaba, SP. Filho de Luís Carlos Libardi e Marta Édina Polizel Libardi. Em fevereiro de 2008 ingressou no Curso de Graduação de Engenharia Agrônômica pela Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ – USP). Foi bolsista de iniciação científica, PIBIC/CNPq, no período de agosto de 2010 a setembro de 2011, sob orientação do Prof. Dr. Edgar Gomes Ferreira de Beauclair. Iniciou em julho de 2015 o curso de Mestrado em Agronomia (Produção Vegetal), na Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Câmpus Jaboticabal-SP, na linha de pesquisa de Engenharia de Água e Solo, sob orientação do Prof. Dr. Rogério Teixeira de Faria e coorientação do Prof. Dr. Alexandre Barcellos Dalri. Atua como Engenheiro Agrônomo, responsável pela produção de mudas pré-brotadas da Usina São Martinho.

## AGRADECIMENTOS

À Deus, por me dar saúde e energia para alcançar meus objetivos e me mostrar que a vida é o maior dos presentes;

Aos meus pais, Luís Carlos e Marta, pelo amor incondicional, doação e construção de meu caráter;

Aos meus irmãos, Luís Henrique e Ana, pela parceria e ânimo para continuar batalhando na vida;

À minha namorada Juliana, pelo amor, carinho e companheirismo, sempre presente para preencher meu coração, até mesmo nos cansativos dias de avaliações;

Ao meu orientador Prof. Dr. Rogério Teixeira de Faria e coorientador Prof. Dr. Alexandre Barcellos Dalri, pela dedicação, confiança e amizade. Serei eternamente grato por todos os momentos e ensinamentos proporcionados;

Ao Prof. Dr. Glauco de Souza Rolim, Assistente Carlos Alberto Santa Capita e amigos Victor Brunini Moreto e José Reinaldo Moraes pela ajuda com o empréstimo e instalação de equipamentos de estação meteorológica;

Ao Prof. Dr. Luiz Fabiano Palaretti pela ajuda na calibração e programação de equipamentos;

À Usina São Martinho por incentivar meu desenvolvimento, cedendo dias de trabalho e financiamento do projeto;

Ao caldeireiro Reinaldo Batista pelo apoio no desenvolvimento e confecção dos lisímetros de pesagem;

À Profa. Dra. Sonia Maria de Stefano Piedade e aos amigos Adibe Luiz Abdalla Filho e Antonio Márcio Souza Rocha pela preciosíssima ajuda com as análises estatísticas;

À Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV/UNESP) e professores pela privilegiada oportunidade de participar do Programa de Mestrado em Produção Vegetal, que me conferiu conhecimento, desenvolvimento pessoal e profissional;

À Campbell Scientific por acreditar neste trabalho conferindo empréstimo de sensor de radiação;

A todos que somaram e construíram minha personalidade, serei eternamente grato.

## SUMÁRIO

	Página
<b>RESUMO .....</b>	<b>ix</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>x</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>4</b>
2.1 A cultura e sua importância econômica .....	4
2.2 Necessidades hídricas.....	5
2.3 Evapotranspiração.....	7
2.3.1 Conceito.....	7
2.3.2 Métodos de determinação de evapotranspiração de cultura .....	8
2.4 Lisímetros .....	9
2.5 Coeficiente de cultura .....	11
2.6 Análise de crescimento.....	12
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>14</b>
3.1 Local de estudo .....	14
3.2 Delineamento experimental e tratamentos do estudo.....	14
3.3 Confeccção e instalação dos equipamentos .....	15
3.4 Calibração dos lisímetros .....	19
3.5 Teste dos lisímetros.....	22
3.6 Procedimentos experimentais.....	22
3.7 Avaliações .....	24
3.8 Condições meteorológicas e irrigação .....	29
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>34</b>
4.1 Lisímetros .....	34
4.2 Determinação da evapotranspiração e coeficiente de cultura .....	39

4.3 Análise de crescimento.....	46
4.4 Eficiência do uso da água.....	55
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>57</b>
<b>6 REFERÊNCIAS.....</b>	<b>58</b>



## EVAPOTRANSPIRAÇÃO E COEFICIENTE DE CULTURA DE MUDAS PRÉ-BROTADAS DE CANA-DE-AÇÚCAR PARA MANEJO DE IRRIGAÇÃO EM CULTIVO PROTEGIDO

**RESUMO** - A produção de mudas pré-brotadas (MPB) de cana-de-açúcar é um método inovador que visa aumentar a taxa de multiplicação da cultura. O sistema é conduzido em cultivo protegido, no qual o manejo correto de irrigação é fator essencial para manter a qualidade da produção. O objetivo do estudo foi expor detalhes da construção e calibração de três lisímetros de pesagem de baixo custo e utilizá-los para determinar evapotranspiração de cultura ( $ET_c$ ) e coeficiente de cultura ( $K_c$ ) de MPB de três cultivares de cana-de-açúcar (CTC9005HP, RB966928 e SP87365), aliados à análise de crescimento, para manejo de irrigação em cultivo protegido. Três lisímetros de pesagem foram construídos especificamente para MPB em casa de vegetação da Usina São Martinho (São Martinho S/A), cada qual com área de  $0,6909 \text{ m}^2$  ( $1179 \text{ mm} \times 586 \text{ mm}$ ), profundidade de  $400 \text{ mm}$  e apoiados sobre 3 células de carga. A calibração dos lisímetros demonstrou precisão e acurácia na detecção de variações de massa equivalente em torno de  $0,1 \text{ mm}$  pelos equipamentos e magnitude de histerese que não comprometeu as avaliações de evapotranspiração. O custo de equipamentos foi baixo, exceto o sistema de aquisição de dados. A determinação de  $ET_c$  e cálculo de  $ET_o$  pelo método FAO-56 possibilitaram inferir valores de  $K_c$  ao longo do ciclo de produção. O consumo hídrico, determinado pela  $ET_c$ , variou de  $3,0$  a  $6,9 \text{ mm d}^{-1}$  na CTC9005HP,  $3,1$  a  $6,8 \text{ mm d}^{-1}$  na RB966928 e  $2,9$  a  $6,6 \text{ mm d}^{-1}$  na SP87365.  $K_c$  teve elevação de  $1,00$  a  $1,46$  na CTC9005HP,  $1,02$  a  $1,53$  na RB966928 e  $1,02$  a  $1,49$  na SP87365. A poda das folhas aos 37 dias após a transferência reduziu  $ET_c$  e, conseqüentemente,  $K_c$  dos tratamentos. Altura de colmos foi superior em SP87365 e CTC9005HP e diâmetro de colmos em RB966928. SP87365 foi superior à CTC9005HP nas avaliações foliares. Massas frescas e secas de colmos e total não diferiram entre cultivares. Épocas de avaliação apresentaram diferenças nas avaliações, confirmando o crescimento das plantas. Portanto,  $ET_c$  e  $K_c$  de MPB foram determinadas por lisímetros de precisão de baixo custo, aliados à análise de crescimento, para manejo de irrigação de MPB em cultivo protegido.

**Palavras-chave:** análise de crescimento, lisímetro, necessidade hídrica

## EVAPOTRANSPIRATION AND CROP COEFFICIENT OF PRE-SPROUTED SUGARCANE PLANTLETS FOR GREENHOUSE IRRIGATION MANAGEMENT

**ABSTRACT** - The pre-sprouted sugarcane plantlets production system (PSS) is an innovative method to enhance crop multiplication rates. This system is greenhouse-grown, where correct irrigation management is essential to maintain the production quality. The purpose of this study was to detail construction and calibration of three low-cost weighing lysimeters and to use them to determine crop evapotranspiration (ET<sub>c</sub>) and crop coefficient (K<sub>c</sub>), allied to growth analysis, of three sugarcane cultivars (CTC9005HP, RB966928 and SP87365), for irrigation management of greenhouse grown PSS. Three specific PSS weighing lysimeters were built in a greenhouse at São Martinho Mill (São Martinho S/A) and covered 0.6909 m<sup>2</sup> (1179 mm x 586 mm) with 400 mm depth supported by 3 load cells. The lysimeters calibration showed precision and accuracy detection of equivalent-mass variations around 0.1 mm and hysteresis that did not compromise evapotranspiration measurements. Low cost materials were used in this study, excluding acquisition data system. Determined ET<sub>c</sub> and calculated FAO-56 ET<sub>o</sub> resulted in production cycle K<sub>c</sub> values. Water requirement, determined by ET<sub>c</sub>, ranged from 3.0 to 6.9 mm d<sup>-1</sup> in CTC9005HP, 3.1 to 6.8 mm d<sup>-1</sup> in RB966928 and 2.9 to 6.6 mm d<sup>-1</sup> in SP87365. K<sub>c</sub> increased from 1.00 to 1.46 in CTC9005HP, 1.02 to 1.53 in RB966928 and 1.02 to 1.49 in SP87365. Treatments leaves pruning at 37 days after transference to greenhouse decreased ET<sub>c</sub> and, consequently, K<sub>c</sub>. Stalk height was higher in SP87365 and CTC9005HP and stalk diameter in RB966928. SP87365 was superior to CTC9005HP in leaf evaluations. Total and stalk fresh and dry masses did not differ between cultivars. Evaluation periods presented difference in evaluations, confirming plants growth. Therefore, ET<sub>c</sub> and K<sub>c</sub> were successfully determined by built precision low-cost lysimeters, allied to growth analysis, for PSS irrigation management in greenhouse grown.

**Keywords:** growth analysis, lysimeter, water requirement

## 1 INTRODUÇÃO

O complexo sucroalcooleiro, proveniente da produção de cana-de-açúcar, constituiu o terceiro maior item exportado pelo agronegócio brasileiro em 2016. Estimativas da safra nacional de 2017/2018 são de 647,6 milhões de toneladas de cana-de-açúcar produzidas em 8,8 milhões de hectares colhidos, com produtividade de 73,27 Mg ha<sup>-1</sup> (CONAB, 2017).

A multiplicação da cultura de cana-de-açúcar, desde o princípio, está fundamentada no enterrio de colmos no solo. No passado, o plantio manual da cultura utilizava a referência de 15 a 21 gemas m<sup>-1</sup> de sulco, ocasionando consumo de colmos de 11 a 14 Mg ha<sup>-1</sup>. Apesar de sucessivos avanços no plantio mecanizado, as falhas se tornaram frequentes neste sistema e, para que não houvesse redução de produtividade, o padrão utilizado para a formação do canavial aumentou para 24 a 60 gemas m<sup>-1</sup> de sulco, elevando-se o consumo de colmos a níveis superiores a 20 Mg ha<sup>-1</sup>. Neste sentido, no intuito de reduzir o uso de gemas do plantio de cana-de-açúcar e, portanto, elevar a taxa de multiplicação da cultura, o sistema de produção de mudas pré-brotadas (MPB) tem se apresentado como método inovador e eficiente. A produção de MPB consiste na formação de plântulas da cultura oriundas de gemas (estrutura reprodutiva assexuada da espécie) contidas nos nós dos colmos, designados de minirrebolos, plantados em tubetes contendo substrato (LANDELL et al., 2012).

A formação de MPB é conduzida em cultivo protegido, sendo que nesta modalidade o manejo correto de irrigação é fator essencial, pois segundo Girardi et al. (2016), o sistema radicular da cultura é limitado ao espaço disponível no recipiente. Desta forma, a irrigação deficitária geralmente causa perdas e menor qualidade na produção, enquanto que a irrigação excessiva aumenta a suscetibilidade da cultura a doenças, o custo de energia por bombeamento, o desperdício de água e a poluição ambiental devido à lixiviação de nutrientes (PARDOSSI; INCROCCI, 2011; DU et al., 2014; CONTRERAS et al., 2017).

A indústria de equipamentos de irrigação apresenta opções de alta tecnologia aos produtores, entretanto, devido à falta de informação sobre a quantidade e momento exato de irrigação, esta prática é realizada empiricamente nos cultivos

(PARDOSSI; INCROCCI, 2011; REPULLO et al., 2015). Este manejo de irrigação empírico e subjetivo predomina no cultivo de MPB em ambiente protegido, ocasionado pela escassez de estudos de necessidade hídrica neste sistema.

Dentre os vários métodos disponíveis para determinação das exigências hídricas de cultivos em geral, o método FAO-56 (ALLEN et al., 1998) é considerado padrão. Neste método, calcula-se a evapotranspiração de cultura (ET<sub>c</sub>), a qual depende das condições meteorológicas, da área foliar e do tipo de solo (ANAPALLI et al., 2016), em função do produto entre o coeficiente de cultura (K<sub>c</sub>), determinado experimentalmente, e a evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>), calculada com dados meteorológicos medidos no local (PERES et al., 2015).

Lisímetros de pesagem são considerados ferramenta-padrão em estudos de consumo hídrico de culturas (ANAPALLI et al., 2016; HAGENAU; MEISSNER; BORG, 2015; MARIANO et al., 2015; PERES et al., 2015). Dentre os lisímetros, destacam-se, pela exatidão, precisão e facilidade operacional, os lisímetros de pesagem (PERES et al., 2015). Estes equipamentos são constituídos de tanque para suportar o alvo de estudo e armazenar água de drenagem, apoiado sobre células de carga que medem variações de massa em forma de sinais elétricos registrados em sistema de aquisição de dados (PEÑALVER et al., 2015; SCHMIDT et al., 2013). Sendo assim, é possível se obter componentes do balanço hídrico, incluindo ET<sub>c</sub>, drenagem, escoamento superficial, precipitação e lâmina de irrigação. Desta forma, é possível determinar o valor de K<sub>c</sub> pela razão entre ET<sub>c</sub> e ET<sub>o</sub> durante o ciclo da cultura (PETERS et al., 2017; ANAPALLI et al., 2016). Não há estudos de lisimetria apropriados para a medição de ET<sub>c</sub> de MPB em ambiente protegido.

Na literatura, não há também conhecimentos sobre K<sub>c</sub> de MPB sob cultivo protegido para determinação da necessidade hídrica de cana-de-açúcar, diferentemente de outras espécies tradicionalmente cultivadas neste ambiente como, por exemplo, berinjela (LOOSE et al., 2014), pepino (FATHALIAN; EMAMZADEI, 2013) e roseira (OLIVEIRA et al., 2014). Existem muitos dados na literatura de K<sub>c</sub> de cana-de-açúcar durante o ciclo de produção no campo (DOORENBOS; PRUITT, 1977; DOORENBOS; KASSAM, 1979; BARBIERI, 1981; PERES, 1988; TOLEDO FILHO, 1988; SILVA et al., 2013a). Entretanto, culturas sob cultivo protegido são manejadas diferentemente daquelas cultivadas em campo aberto, pois o microclima

dentro das estufas é diferente do ambiente externo, e os valores de  $K_c$  determinados no ambiente externo não podem ser usados para cultivos protegidos (SHARNA et al., 2017).

De acordo com Silva et al. (2013b), o índice de crescimento que apresenta a maior correlação com a necessidade hídrica da cultura é o índice de área foliar (IAF). Portanto, há necessidade de se analisar o crescimento para determinar o consumo hídrico de MPB de cultivares de cana com características vegetativas distintas.

Devido à falta de informações sobre a necessidade hídrica e crescimento de MPB em cultivo protegido, o presente trabalho teve por objetivos expor detalhes da construção e calibração de três lisímetros de pesagem de baixo custo e utilizá-los para determinar  $ET_c$  e  $K_c$  de MPB de três cultivares de cana-de-açúcar (CTC9005HP, RB966928 e SP87365), aliados à análise de crescimento, para manejo de irrigação em cultivo protegido.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 A cultura e sua importância econômica

A cultura da cana-de-açúcar compreende híbridos de várias espécies do gênero *Saccharum*, pertencentes à família Poaceae (FIGUEIREDO, 2010), cultivada entre a latitude de 36°N e 31°S, desde o nível do mar até 1.000 m de altitude (FRANCISCO; SANTOS; LIMA, 2017). A cultura apresenta grande importância econômica por ser matéria prima para amplo espectro de produtos à base vegetal, incluindo alimentos (açúcar e derivados), bioenergia (etanol e bioeletricidade), materiais estruturais (bioplástico) e produtos de alto valor agregado (temperos e fragrâncias) (SCHEITERLE et al., 2017).

Recentemente, muitos países apresentam tendência em adotar políticas e estratégias para promover o desenvolvimento da “bioeconomia”, definida como a produção fundamentada no conhecimento e utilização de recursos, processos e princípios inovadores biológicos para o fornecimento sustentável de bens e serviços em todos setores da economia (GLOBAL BIOECONOMY SUMMIT, 2015). Esta tendência foi marcada durante o *Global Bioeconomy Summit* no ano de 2015 em Berlin, que reuniu especialistas e público estratégico de mais de 50 países (SCHEITERLE et al., 2017).

Neste contexto, a agroindústria sucoenergética apresenta papel fundamental pela produção de etanol proveniente da cana-de-açúcar, pois evita o esgotamento das jazidas petrolíferas, o elevado preço do petróleo e por ser considerado um combustível ecologicamente correto, visto que é oriundo de fonte renovável e emite menor quantidade de gases poluentes na atmosfera quando comparado aos combustíveis fósseis. O aumento da demanda mundial por etanol aliado às grandes áreas cultiváveis e condições edafoclimáticas favoráveis à cana-de-açúcar, tornam o Brasil um país promissor para a exportação desta comódite (CONAB, 2017).

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e o complexo sucroalcooleiro constituiu o terceiro maior item exportado pelo agronegócio brasileiro em 2016. Estimativas da safra nacional de 2017/2018 são de 647,6 milhões de toneladas de cana-de-açúcar produzidas em 8,8 milhões de hectares colhidos, com produtividade média de 73,27 Mg ha<sup>-1</sup> (CONAB, 2017).

O sucesso na produção de cana-de-açúcar no Brasil reduz significativamente a dependência nacional por combustíveis fósseis, aumenta a segurança energética, contribui para a prosperidade econômica do país pela geração de renda, exportações e impostos, traz benefícios sociais como empregos e riqueza nas pequenas cidades e reduz impactos ambientais devido à mitigação de consequências negativas de mudanças climáticas e melhoria da qualidade do ar nas cidades (FILOSOFO et al., 2015; VIANA; PEREZ, 2013).

## **2.2 Necessidades hídricas**

A água é um dos principais recursos para o crescimento das culturas, sendo inevitável a mudança no foco da agricultura para maximização da eficiência do uso deste recurso com maior ênfase no aumento de eficiência no uso da água, definida como a taxa entre a produtividade das culturas e consumo hídrico, ao invés de produção de massa por unidade de área (KIM et al., 2015; DU et al., 2014). Portanto, destacam-se manejos que atendam às necessidades hídricas das culturas e tecnologias que reduzam este consumo, como por exemplo o cultivo protegido (PANDORFI et al., 2016).

A determinação precisa e correta dos fluxos de água envolvidos nos sistemas de cultivo é de fundamental importância para propósitos de manejo agro hidrológicos, assim como para a pesquisa científica básica, para melhorar o entendimento dos processos de trocas de água nestes sistemas. Até o momento, muitos destes processos não estão completamente compreendidos (SCHRADER et al., 2013).

O objetivo do manejo hídrico é minimizar o consumo de água com maximização da produção pela manutenção do estado vegetativo das plantas. Esta redução no consumo também afeta a redução nos custos por bombeamento. Para isto, os produtores devem possuir informação que ajudem na tomada de decisão sobre a quantidade e momento de irrigação (REPULLO et al., 2015). Entretanto, na prática, a maioria dos agricultores estão desatualizados, implementando manejo hídrico baseado nas medidas de umidade e salinidade na zona radicular, sem a interpretação destes dados (CARVAJAL et al., 2017).

Para a correta programação da irrigação é necessário acurácia na quantificação da demanda hídrica das plantas, apresentando-se como importante

ferramenta de planejamento e projeto do sistema de irrigação (AYYOUB et al., 2017; CARVAJAL et al., 2017).

A determinação da necessidade hídrica das culturas é realizada por meio de técnicas que permitem quantificar as entradas (precipitação e irrigação) e saídas (transpiração, evaporação e drenagem) de água para estimar o balanço hídrico do sistema (PEÑALVER et al., 2015).

Neste propósito, classifica-se os métodos em modelos obtidos por dados meteorológicos, determinação de condições hídricas do solo e determinação de condições hídricas das plantas. Nos modelos baseados em dados meteorológicos, registros destas variáveis são utilizados para estimar o balanço hídrico do solo por meio de fórmulas empíricas e modelos de evapotranspiração. No método de determinação de condições hídricas do solo, sensores de umidade de solo são utilizados para quantificar o armazenamento de água, potencial de água e balanço hídrico no solo. Apesar da simplicidade na utilização e boa adoção pelos agricultores, este método não apresenta confiabilidade na representatividade dos dados, visto que exploram pequenos volumes de solo, sem calibração correta para o tipo de solo onde são utilizados e apresentam muitos problemas causados por presença de pedras, cavidades subterrâneas entre outros. No método de determinação de condições hídricas das plantas, sensores são utilizados para avaliação do estresse hídrico nas plantas. Apesar de promissor, este método apresenta dificuldades na interpretação e obtenção de sensores confiáveis. Deste modo, outra forma de avaliar a demanda hídrica culturas é mensurar amostra de plantas e extrapolar para uma área maior. Pode-se realizar esta avaliação com a utilização de lisímetros de pesagem ou balanço hídrico detalhado (PEÑALVER et al., 2015; REPULLO et al., 2015).

Estações meteorológicas podem ser utilizadas para estimativa da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) (VILELA et al., 2015; PEÑALVER et al., 2015) que ajustada por coeficientes de cultura (K<sub>c</sub>) determinam a evapotranspiração específica para cada cultivar, solo e clima (PEÑALVER et al., 2015).

Portanto, estudos que visam estabelecer boas práticas de manejo hídrico, associadas às necessidades hídricas das culturas, convergem para aumento de produtividade e eficiência no uso da água e de sistemas de irrigação (MARIN et al., 2016).



## 2.3 Evapotranspiração

### 2.3.1 Conceito

A evapotranspiração (ET) é definida como processo de transferência de água para a atmosfera na forma de evaporação no solo, em cursos d'água e da precipitação interceptada pela vegetação e transpiração da vegetação (ZHANG et al., 2016).

A evaporação é o processo físico de mudança do estado líquido de uma substância para o estado gasoso (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2007). A transpiração é a perda de água pelas plantas na forma de vapor, predominantemente por meio das folhas. Neste processo ocorre evaporação a partir das paredes celulares, por meio de espaços de ar intercelulares, em direção aos estômatos, nos quais a água na forma de vapor passa por difusão à atmosfera (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2007).

A ET é influenciada pela demanda atmosférica, regulada por fatores meteorológicos (radiação líquida, temperatura, umidade relativa e velocidade do vento), e pelas condições de superfície, determinadas pelo tipo de solo (presença de impedimentos químicos e físicos), manejos culturais (densidade e orientação do plantio) e cobertura vegetal (espécie, albedo, estágio de desenvolvimento, altura e profundidade do sistema radicular) (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2007).

Os princípios que regem o processo da ET são o fluxo de massa e a transferência de energia em forma de calor latente (PETERS et al., 2017; SCHMIDT et al., 2013). Parte da energia radiante é transformada em calor latente de vaporização, enquanto o restante é utilizado no aquecimento das plantas, do ar e do solo (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2007).

A ET é um dos componentes hidrológicos e meteorológicos dominantes no complexo solo-planta-atmosfera e um dos mais importantes do ciclo da água na natureza (LIU et al., 2017; SCHMIDT et al., 2013). O estudo da ET é fundamental para determinar as necessidades hídricas dos cultivos e ecossistemas e, portanto, importante fator na estimativa de balanço hídrico e de energia, nas estimativas de produtividade, no manejo de irrigação, na gestão de bacias hidrográficas e em modelagens meteorológicas e hidrológicas (JI et al., 2017; PERERA et al., 2015; LIMA et al., 2013).

A evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) é definida como a taxa de evapotranspiração de grama hipotética com características específicas, caracterizada como superfície de referência. ET<sub>o</sub> é um parâmetro climático, influenciado e calculado por variáveis meteorológicas, expressando o potencial atmosférico de evapotranspiração em local e período específicos, desconsiderando fatores de cultura e solo (ALLEN et al., 1998).

A evapotranspiração de cultura (ET<sub>c</sub>) é definida como a evapotranspiração de uma determinada cultura, em condições ótimas de cultivo extenso, sob os aspectos de manejo, nutrição, água no solo, pragas e doenças, proporcionando máxima produção nas condições meteorológicas atuantes (ALLEN et al., 1998).

### **2.3.2 Métodos de determinação de evapotranspiração de cultura**

As determinações diretas da ET<sub>c</sub> dos cultivos e vegetação natural são realizadas por métodos que utilizam os princípios de fluxo de massa e balanço de energia, os quais regem o processo de evapotranspiração (SCHMIDT et al., 2013).

Destacam-se entre os métodos baseados em fluxo de massa a lisimetria, o balanço hídrico (utilizando medidor de nêutrons, método gravimétrico ou sensores de água no solo), o sensoriamento remoto (baseado em satélite e modelagem direta) e o fluxo de seiva, enquanto que em balanço de energia utiliza-se a razão de Bowen (MARQUES et al., 2015; SCHMIDT et al., 2013).

Entretanto, motivados pelo alto custo e demanda de trabalhos especializados nas determinações diretas de ET<sub>c</sub>, existem métodos indiretos, nos quais são utilizados ajustes com coeficientes em estimativas de ET<sub>o</sub> calculadas por meio de dados meteorológicos, sendo que a escolha do método de estimativa de ET<sub>o</sub> depende da disponibilidade de dados meteorológicos, do intervalo de tempo da estimativa e das condições climáticas do local (MARTINS, 2016).

O método de Penman-Monteith é considerado padrão para estimativas de ET<sub>o</sub> (ALLEN et al., 1998), visto que incorpora os aspectos aerodinâmicos e energéticos (OLIVEIRA et al., 2014).

O método padrão (FAO) de estimativa de ET<sub>c</sub> utiliza a estimativa de ET<sub>o</sub>, baseada em dados meteorológicos, integrados a coeficientes da cultura. Devido à falta de informação para as diferentes culturas, a estimativa de ET<sub>o</sub> é feita pelo método

Penman-Monteith, enquanto que a razão entre  $ET_c$  e  $ET_o$  é estudada experimentalmente, chamada de coeficiente de cultura ( $K_c$ ), e utilizada para determinar  $ET_c$ , de acordo com a equação  $ET_c = K_c \times ET_o$  (ALLEN et al., 1998).

## 2.4 Lisímetros

Lisímetros são equipamentos utilizados como método padrão em estudos hidrológicos na determinação de componentes do balanço hídrico, pois promovem leituras extremamente confiáveis de forma direta e precisa (SILVA et al., 2016; HAGENAU; MEISSNER; BORG, 2015; MARQUES et al., 2015; LIMA et al., 2013).

As principais determinações lisimétricas são evapotranspiração (ET), drenagem (D), escoamento superficial, precipitação (P) e irrigação (I) (SILVA et al., 2016; HAGENAU; MEISSNER; BORG, 2015; PEÑALVER et al., 2015; LIMA et al., 2013). Além disso, com as medidas lisimétricas é possível determinar o coeficiente de cultura ( $K_c$ ), definido pela razão entre  $ET_c$ , medida diretamente, e  $ET_o$ , estimada utilizando equações consagradas, como a padrão de Penman-Monteith proposta por ALLEN et al., 1998 (ABEDINPOUR, 2015; OLIVEIRA et al., 2014).

Estes equipamentos são constituídos por tanque impermeável, contendo o alvo de estudo para identificação dos componentes do balanço hídrico e são classificados em lisímetros de drenagem, lençol freático constante e pesagem, sendo este último o único a medir diretamente ET por variações de massa. Toda a montagem é realizada em tanque com dimensões que permitem o acesso ao seu interior para manutenção e calibração. A superfície do equipamento deve estar no mesmo nível da superfície ao redor, estando indetectável a olho nu, visto que é coberto por uma cultura. As limitações deste tipo de lisímetro estão relacionadas ao trabalho árduo na sua instalação, alto custo, ocupam áreas grandes, operações de manutenção complicadas, falta de automação e manuseio restrito, entre outros (PEÑALVER et al., 2015; PEREIRA; VILLA NOVA; SEDIYAMA, 2013).

Agrônomos utilizam estes dispositivos individualmente ou como parte de estações lisimétricas para estudar ET dos cultivos por variações de massa de áreas específicas (PEÑALVER et al., 2015; CARVAJAL et al., 2017). Na maioria dos casos, os lisímetros são considerados pequenas amostras representativas de grandes áreas.

Posteriormente, os resultados destas medidas são extrapolados para uma área maior (HAGENAU; MEISSNER; BORG, 2015).

Dentre os lisímetros, destacam-se, pela sua exatidão, precisão e facilidade operacional, os lisímetros de pesagem, os quais são apoiados sobre células de carga como mecanismo de pesagem, interligados a datalogger para medir variações de massa em intervalo de tempo definido (HAGENAU; MEISSNER; BORG, 2015; PERES et al., 2015). Enquanto a irrigação e precipitação adicionam água ao lisímetro, incrementando massa, a drenagem e evapotranspiração removem água, causando o decréscimo da massa total do sistema (SCHMIDT et al, 2013).

A elevada precisão é decorrente de sua grande área de abrangência em comparação a outros dispositivos e ao grande aparato tecnológico, verificados principalmente naqueles equipados eletronicamente (PETERS et al., 2017; LIMA et al., 2013). Os principais fatores para minimizar erros são grande profundidade do tanque do lisímetro e superfície do lisímetro com características similares e no mesmo nível da superfície ambiente externa em torno do equipamento (PETERS et al., 2017).

Uma das dificuldades de se utilizar a lisimetria é o alto custo de construção e instalação (SILVA et al., 2016; REPULLO et al., 2015; CARVAJAL et al. 2017). Em geral, é recomendado que a área de superfície do lisímetro seja grande o suficiente para maximizar a área amostrada e minimizar o efeito do espaço entre lisímetro e superfície externa (SILVA et al., 2016). Outra desvantagem dos lisímetros é a determinação de ET<sub>c</sub> em intervalos de horas ou dias, sendo que a maioria destes equipamentos não possuem acurácia necessária para medições em intervalos mais curtos, com exceção de microlisímetros com plantas envazadas (CARVAJAL et al., 2017). É necessária alta resolução temporal se os eventos de P e ET variam em um curto intervalo de tempo (PETERS et al., 2017). Entretanto, a combinação de alta resolução temporal e alta sensibilidade na detecção de variações de massa do equipamento originam ruídos causados por distúrbios externos, vento por exemplo, que se tornam cada vez mais aparentes nos dados (NOLZ; KAMMERER; CEPUDER, 2013).

Antes de efetuar as medidas lisimétricas em campo é fundamental anteceder a calibração, que visa estabelecer relação entre o sinal de saída da célula de carga (geralmente expresso em mV) e a massa do sistema, além de verificar a linearidade

e histerese do sistema. Portanto, é imprescindível promover alguns testes, antes e durante a utilização dos lisímetros de pesagem para o estudo de consumo hídrico das culturas. Esse processo tem objetivo de conhecer melhor o equipamento e fornecer dados confiáveis em curtos intervalos de tempo, além de aumentar o poder de decisão sobre quais dados são úteis e quais devem ser corrigidos ou excluídos (NASCIMENTO et al., 2016).

## 2.5 Coeficiente de cultura

O coeficiente de cultura ( $K_c$ ) é um método de determinação do consumo hídrico por evapotranspiração de uma cultura e é definido como a razão entre  $ET_c$  e  $ET_o$ , mensuradas em um mesmo período durante o cultivo de uma cultura (PERES et al., 2015; OLIVEIRA et al., 2014). Este coeficiente considera fatores de estágio fenológico da cultura, tipo de irrigação (aspersão, localizada, entre outros) e técnicas de cultivos, tais como poda, densidade de plantio, entre outros (REPULLO et al., 2015).

A maioria das variáveis meteorológicas são incorporadas na estimativa de  $ET_o$ . Entretanto,  $ET_o$  representa uma demanda climática, enquanto que o  $K_c$  agrega características específicas da cultura em condições restritas de clima. Isso possibilita valores padrões de  $K_c$  para regiões e condições climáticas específicas. Esta é uma das principais razões da aceitação global e aplicabilidade deste método (ALLEN et al., 1998).

A equação FAO de  $K_c$  determina  $ET_c$  sobre condições padrões. Isto representa o maior valor da evapotranspiração da cultura sob condições sem limitações de água, densidade de cultivo, doenças, plantas daninhas, insetos e salinidade (ALLEN et al., 1998).

O  $K_c$  integra os efeitos de características que distinguem uma cultura qualquer de uma cultura de referência, a qual possui uma aparência constante e cobertura total do solo. Consequentemente, diferentes culturas possuem diferentes  $K_c$ . As mudanças nas características da cultura durante as épocas de cultivo também afetam os valores de  $K_c$ . Finalmente, como a evaporação é contemplada em  $ET_c$ , condições que afetam a evaporação do solo também possuem interferência no  $K_c$  (ALLEN et al., 1998).

## 2.6 Análise de crescimento

O crescimento das plantas é definido como o processo de expansão celular que resulta no aumento irreversível de volume das células vegetais, regulado pela pressão de turgor (TAIZ et al., 2013). Este processo é afetado por fatores intrínsecos, relacionados à eficiência metabólica, e extrínsecos, controlados pelas condições ambientais (SAMPAIO, 2010).

O crescimento de mudas de cana-de-açúcar, tal como o de outras culturas, é determinado principalmente pelas variáveis climáticas e pela quantidade de água e nutrientes disponíveis, podendo ser controlado pelo manejo destas variáveis. Por esta razão, o uso de casas de vegetação é ideal para o crescimento das mudas, visto que as variáveis podem ser controladas para atingir o crescimento e desenvolvimento ótimos das plantas e acelerar o ciclo de produção (PAMUNGKAS; HATOU; MORIMOTO, 2013; RODRÍGUEZ et al., 2015).

O crescimento de um vegetal ou comunidade pode ser estudado por meio de diversas medidas, caracterizadas como análise de crescimento, realizadas na planta como um todo ou em órgãos isolados. Estas medidas são utilizadas para mensurar o acúmulo de biomassa e desempenho do sistema assimilatório das plantas e são conceitualmente classificadas em lineares, superficiais, de massa e de número de unidades estruturais, sendo a escolha dependente do objetivo de estudo, disponibilidade de material, equipamentos e mão de obra (ALVARENGA; NERY; RODRIGUES, 2015).

A grandeza utilizada nas medidas lineares é o comprimento, nas superficiais é a área, nas de massa é a massa, enquanto que nas de número de unidades estruturais é a quantidade. Estas medidas são realizadas para compor índices para avaliação, sob diferentes aspectos, do desempenho do crescimento das plantas ao longo do tempo. Os principais índices utilizados são taxa de crescimento absoluto (TCA), taxa de crescimento relativo (TCR), taxa de assimilação líquida (TAL), taxa de crescimento da cultura (TCC), índice de área foliar (IAF), razão de área foliar (RAF), área foliar específica (AFE) e razão de massa de folhas (RMF) (ALVARENGA; NERY; RODRIGUES, 2015).

O IAF é a relação entre área foliar (AF) e área da superfície de terreno ocupada pelas folhas (AT), sendo indicador da cobertura do terreno pelas folhas e de suas

consequências na interceptação de luz. As razões foliares descrevem o crescimento sob o aspecto de AF. A RAF é a relação entre AF e matéria seca (MS) da planta, enquanto que a AFE relaciona AF com a MS somente das folhas. A RMF é a relação entre MS foliar e MS da planta (ALVARENGA; NERY; RODRIGUES, 2015).

As taxas de crescimento fundamentam-se no incremento de determinada quantidade de material vegetal em intervalo de tempo preestabelecido. TCA refere-se somente ao ganho de massa vegetal, enquanto que a TCR representa o aumento de quantidade de material vegetal, a partir do material previamente existente. A TAL é mais elaborada, pois refere-se ao incremento de MS total da planta por unidade de AF. A TCC é o produto entre TAL e IAF (ALVARENGA; NERY; RODRIGUES, 2015).

A análise de crescimento é uma ferramenta essencial para estudos sobre atividades morfofisiológicas das plantas, proporcionando avaliação da produção líquida das plantas sob diferentes condições genéticas e ambientais (ALVARENGA; NERY; RODRIGUES, 2015; SAMPAIO, 2010; CAIRO; OLIVEIRA; MESQUITA, 2008).

### **3 MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1 Local de estudo**

O presente trabalho foi conduzido em casa de vegetação de um viveiro de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar da Usina São Martinho (São Martinho S/A), localizada na latitude 21°19'23" Sul, longitude 48°06'47" Oeste e 528 m de altitude, no município de Pradópolis, SP. De acordo com Köppen, o clima é classificado como subtropical úmido, Cwa (ALVARES et al., 2013), com precipitação média anual de 1.400 mm e temperatura média anual de 22,7°C, com inverno seco e ameno e verão quente e chuvoso (CEPAGRI, 2016). A casa de vegetação do estudo foi composta por 8 vãos com arcos de 7 m de largura e 24 módulos de 4,5 m de comprimento, totalizando 6048 m<sup>2</sup> (56 m de largura e 108 m de comprimento). Na cobertura, foi utilizado filme difusor antivírus Ginegar Polysack, com espessura de 150 µm e tratamento contra raios ultravioletas com filtro de 15% da radiação solar, enquanto que as frontais e laterais foram constituídas de tela branca com espessura de 150 µm e tratamento contra raios ultravioletas com filtro de 30%.

#### **3.2 Delineamento experimental e tratamentos do estudo**

Foram avaliados os fatores cultivares (CTC9005HP, RB966928 e SP87365) e períodos de avaliação (7, 14, 21, 28 e 41 DAT).

O delineamento experimental utilizado na análise de crescimento foi inteiramente casualizado, com cinco repetições, em esquema de parcelas subdivididas no tempo, estando nas parcelas as cultivares de cana-de-açúcar (CTC9005HP, RB966928 e SP87365), e nas subparcelas, os períodos de avaliação (5 períodos), sendo cada unidade experimental constituída por 7 bandejas totalizando 378 plantas. As plantas localizadas nas extremidades das bandejas foram consideradas bordaduras. As médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste de Tukey, ao nível de 1% de significância.

A cultivar CTC9005HP foi desenvolvida pelo Centro de Tecnologia Canavieira (CTC) e apresenta características de posicionamento em ambientes de produção mais favoráveis (A, B e C), sendo classificada no grupo de maturação precoce a média, indicada para colheita entre os meses de abril a julho. Apresenta elevada taxa de



multiplicação, devido sua capacidade de produção de gemas por unidade de área, que em média atinge 1,65 milhões de gemas por hectare. A cultivar RB966928 foi desenvolvida pela Universidade Federal do Paraná (UFPR), apresenta elevado teor de sacarose, tolerância à maioria das doenças de cana-de-açúcar (exceto carvão – *Sporisorium scitamineum*), brotação em cana-planta e cana-soca muito boa, elevada adaptação à colheita mecanizada, raro florescimento, tombamento eventual e média tolerância à herbicidas. É recomendada para ambientes de médio a alto potencial edafoclimático (A e B), indicada para colheita entre os meses de abril a maio, portanto, classificada no grupo de maturação precoce. Enquanto que a cultivar SP87365 foi desenvolvida pela antiga Coopersucar, atualmente Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), destaca-se pela alta produtividade, elevada tolerância à broca da cana-de-açúcar, baixa tolerância à deficiência hídrica e à herbicidas. É recomendada para ambientes de alto potencial edafoclimático (A e B), indicada para colheita entre os meses de julho a setembro, portanto, classificada no grupo de maturação média.

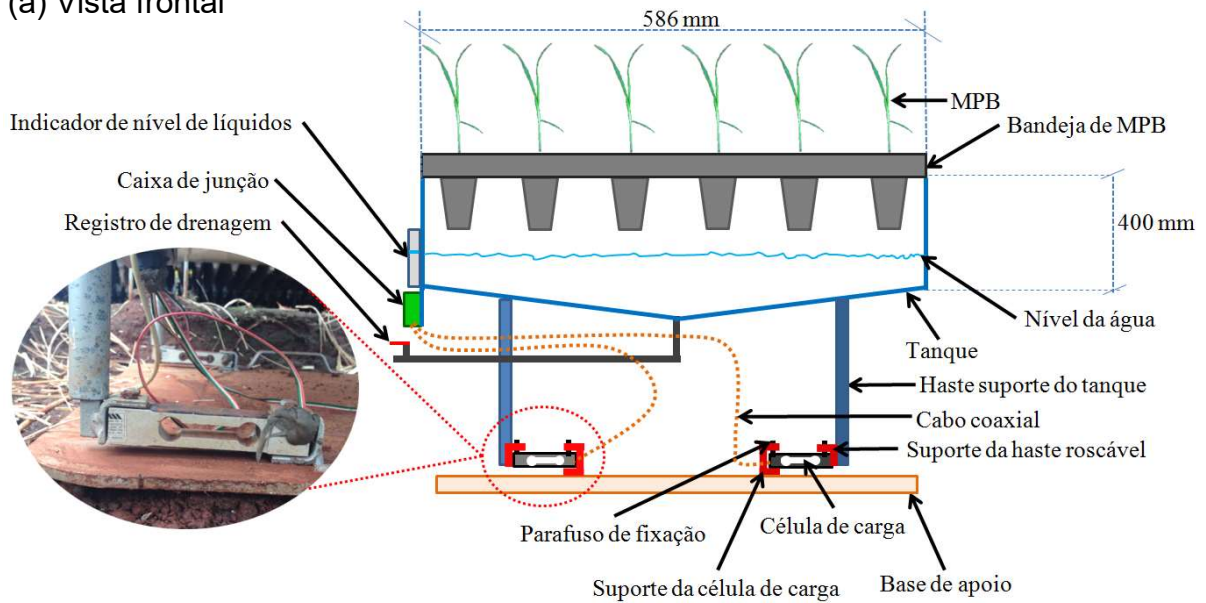
### **3.3 Confeção e instalação dos equipamentos**

Foram instalados três lisímetros de pesagem (Lisímetro CTC9005HP, Lisímetro RB966928 e Lisímetro SP87365) na casa de vegetação, cada qual confeccionado para suportar um conjunto de três bandejas compostas por 54 tubetes de 125 cm<sup>3</sup> cada, totalizando 162 plantas de MPB de cana-de-açúcar por lisímetro.

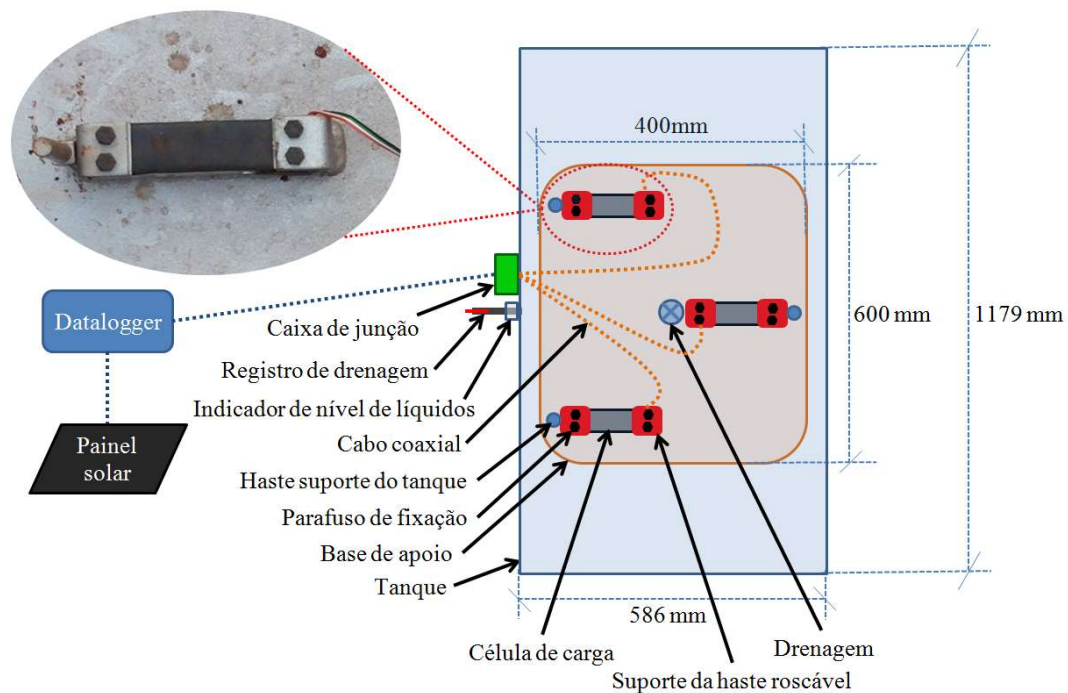
Os tanques dos lisímetros foram confeccionados em formato retangular com dimensões de 1179 mm de comprimento, 586 mm de largura (0,6909 m<sup>2</sup>) e 400 mm de altura, utilizando chapas de aço-carbono de 1,58 mm de espessura que foram pintadas com tinta epóxi cinza para impedir a oxidação dos materiais (Figura 1). Com o intuito de facilitar o escoamento de água de drenagem na parte inferior dos tanques, foram instaladas quatro chapas no sentido diagonal entre os quatro vértices, formando um sistema de escoamento em quatro águas. No centro da parte inferior, foi instalado um tubo e registro manual, também de aço-carbono. Em cada tanque lisimétrico, foi instalado um suporte para caixa de junção de células de carga na lateral de maior dimensão (1179 mm), o qual também foi confeccionado em aço-carbono de espessura 12,7 mm, porém com dimensões de 200 mm de comprimento e 150 mm de largura. Ao lado da caixa de junção, também foi instalado um indicador de nível cujo objetivo

era o monitoramento do nível de água e identificação do momento de realizar a drenagem da água em excesso. Sob cada tanque foram soldadas três hastes maciças de 150 mm de comprimento e 24 mm de diâmetro, com presença de roscas externas em toda sua extensão. Para a regulagem de altura, nestas hastes maciças, foram rosqueadas hastes ocas de 250 mm de comprimento, 30 mm de diâmetro e 3 mm de espessura, com roscas internas também em toda sua extensão, possibilitando um comprimento máximo do conjunto de hastes rosqueadas de até 400 mm. A parte inferior da haste oca foi encaixada em haste maciça lisa de 80 mm de comprimento e 24 mm de diâmetro, parafusada na face superior de uma das laterais da célula de carga. Na outra lateral, as faces superior e inferior das células de carga foram parafusadas em suportes soldados em base retangular de apoio de dimensões de 600 mm de comprimento, 400 mm de largura e 12,7 mm de espessura. A base foi assentada no solo por meio de quatro hastes pontiagudas de 150 mm de comprimento e 20 mm de diâmetro, localizadas nas 4 extremidades da parte inferior para penetração e fixação da base ao solo.

(a) Vista frontal



(b) Vista superior

**Figura 1.** Esquema frontal (a) e superior (b) dos lisímetros.

Anteriormente à instalação dos lisímetros, realizou-se o nivelamento do solo e assentamento de base de apoio no local de instalação. Os suportes das células de carga foram, então, instalados sobre a base de apoio principal, sendo as células de carga posteriormente instaladas nestes suportes. Dois parafusos foram utilizados para fixar as células de carga nos suportes. Em seguida, todo tanque lisimétrico foi apoiado

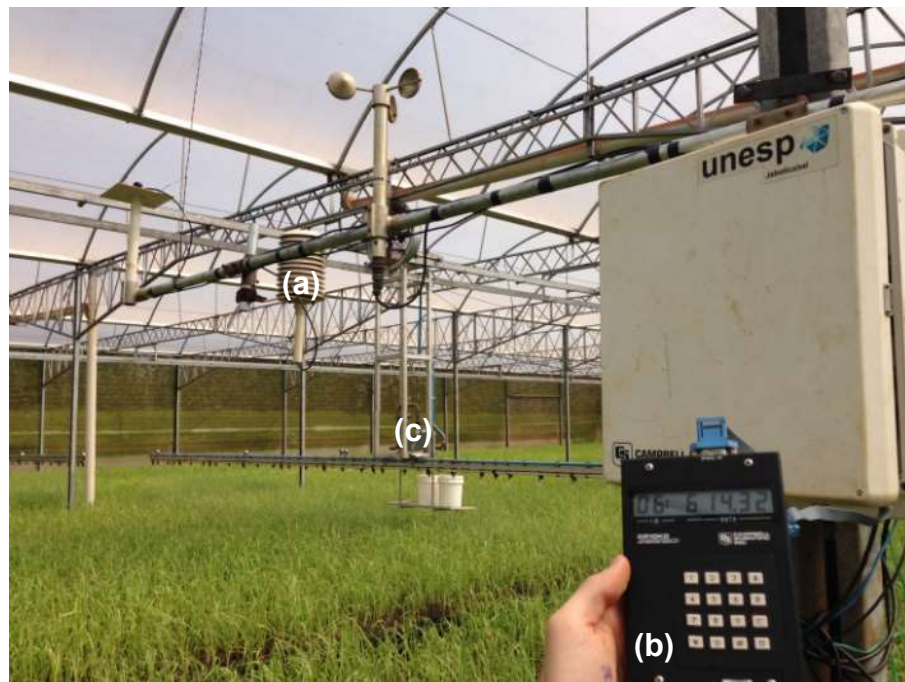
pelo conjunto triplo de células de carga. As hastes dos lisímetros foram fixadas na parte superior das células de carga, também utilizando dois parafusos para a correta fixação. A caixa de junção foi devidamente fixada por quatro parafusos no suporte de caixa de junção. Ajustes de posicionamento foram feitos para garantir a livre flutuação dos tanques sobre as células de carga para que não houvesse interferência externa.

Posteriormente, foi instalado o sistema de aquisição de dados dos lisímetros, composto de datalogger, multiplexador e painel solar para o fornecimento de energia elétrica para uma bateria. A instalação foi realizada utilizando-se suportes de aço pré-fabricados e fixados em postes de sustentação da estrutura da casa de vegetação. Após a instalação estrutural, foi realizada a conexão de cabos entre células de carga, caixas de junção e sistema de aquisição de dados dos lisímetros.

As células de carga utilizadas (GL-30, Alfa Instrumentos Eletrônicos Ltda., São Paulo, SP, Brasil) eram fabricadas em alumínio com capacidade nominal de 30 kg, sensibilidade de  $2,0000 \pm 10\% \text{ mV V}^{-1}$  e acuracidade de 0,03% do fundo de escala segundo o fabricante. Uma caixa de junção (4134 A, Alfa Instrumentos Eletrônicos Ltda., São Paulo, SP, Brasil) por lisímetro foi utilizada. Esta tinha a função de combinar o sinal elétrico das três células de carga que, então, era retransmitido por intermédio de somente um cabo coaxial até o datalogger. Um sistema de aquisição de dados para os três lisímetros foi utilizado para a coleta e armazenamento dos dados provenientes das células de carga. Este sistema foi composto por multiplexador de canais diferenciais (AM 416 Relay Multiplexer, Campbell Scientific, Logan, Utah, USA) e datalogger (CR10, Campbell Scientific, Logan, Utah, USA). A alimentação elétrica do sistema foi realizada com bateria de tensão 12 V e corrente 7 A acoplada a um painel solar (SP20R-PW, Campbell Scientific, Logan, Utah, USA). A transferência dos dados armazenados foi realizada diretamente para microcomputador ou indiretamente para módulo de memória que posteriormente teve os dados transferidos em microcomputador por meio de software (PC200W, Campbell Scientific, Logan, Utah, USA) específico para esta finalidade. O datalogger foi programado para realizar leituras das células de carga a cada segundo e o armazenamento dos dados foi publicado com média a cada 20 minutos.

Foi instalada uma estação meteorológica com sensores para registro de temperatura e umidade relativa no dossel (HC2SC3-L, Campbell Scientific, Logan,

Utah, USA) protegidos com escudo de radiação 12 placas, radiação solar global (CS300-L, Campbell Scientific, Logan, Utah, USA), saldo de radiação solar a 2 metros do solo (NR-LITE2, Campbell Scientific, Logan, Utah, USA) e de velocidade do vento a 2 metros do solo (A100LK, Campbell Scientific, Logan, Utah, USA). O sistema de aquisição de dados desta estação meteorológica era independente do sistema de aquisição de dados dos lisímetros, sendo configurado para realizar leituras a cada segundo e armazenar a média dos dados a cada 10 minutos por meio de datalogger (CR10X, Campbell Scientific, Logan, Utah, USA), também com a presença de multiplexador de canais diferenciais (AM 416 Relay Multiplexer, Campbell Scientific, Logan, Utah, USA) e bateria de tensão 12 V e corrente 7 A alimentada por painel solar (SX10M, Campbell Scientific, Logan, Utah, USA) (Figura 2).



**Figura 2.** Estação meteorológica (a), display do módulo de aquisição de dados (b) e barra de irrigação (c).

### 3.4 Calibração dos lisímetros

Após a instalação, a calibração dos três lisímetros foi realizada em 25 de setembro de 2016 e teve duração de 3 horas e 20 minutos (07h00min às 10h20min), sendo aproximadamente 1 hora por lisímetro e 20 minutos para preparativos da calibração. Durante a calibração, a temperatura do ar no dossel oscilou de 15,4°C a

28,4°C, a umidade relativa de 87,9% a 54,3%, e a velocidade do vento a 2 m de 0,0 a 0,8 m s<sup>-1</sup>.

A metodologia utilizada no processo de calibração dos lisímetros consistiu na correlação entre sinal elétrico (SE), emitido pelas células de carga, e massas conhecidas aplicadas no sistema, com o intuito de estabelecer a linearidade e histerese destas medidas (FARIA; CAMPECHE; CHIBANA, 2006). Antes de iniciar a bateria de calibração, uma massa de 26,4 kg foi inserida sobre cada lisímetro, sendo esta equivalente à massa das três bandejas com mudas, com a finalidade de representar o peso morto em cada lisímetro.

Para a calibração, foram utilizados sacos hermeticamente fechados preenchidos com areia previamente seca em estufa de circulação forçada de ar a 60°C durante 48 h. Para a aferição de massas conhecidas, foi utilizada balança digital de precisão 0,01 g. Os sacos plásticos totalizaram 40 unidades, dos quais 30 continham massa de 664,68 g (saco S1), equivalente a 0,962 mm, e 10 unidades possuíam massa de 66,47 g (saco S2), equivalente a 0,0962 mm. A massa equivalente (ME) em mm foi obtida pela relação entre a massa de areia pela área do lisímetro (0,6909 m<sup>2</sup>). Após estabelecido o peso morto do lisímetro, iniciou-se a bateria de adição e remoção de massa no lisímetro. A sequência de adição e remoção dos sacos foi escolhida para que a calibração compreendesse variações de massa equivalente de aproximadamente 3 mm (conjunto de 3 sacos S1), 0,3 mm (conjunto de 3 sacos S2) e 0,1 mm (1 saco S2) até atingir massa equivalente total de aproximadamente 30 mm. Foram adicionados 5 vezes um conjunto de 3 sacos S1 (2,886 mm), proporcionando massa equivalente a 14,4349 mm, 1 vez um conjunto de 3 sacos S2 (0,2886 mm), totalizando 14,7195 mm, 4 vezes 1 saco S2 (0,0962 mm), totalizando 15,1043 mm, 1 vez um conjunto de 3 sacos S2 (2,8860 mm), totalizando 15,3930 mm, 5 vezes um conjunto de 3 sacos S1 (0,2886 mm), totalizando 29,8238 mm. Por fim, em sequência inversa, o mesmo procedimento foi realizado para a descarga dos lisímetros. O tempo entre cada adição e remoção foi de 30 seg, sendo a leitura da voltagem da célula de carga realizada aos 10 e 20 após a adição ou remoção da massa conhecida. Os 10 segundos de diferença foram escolhidos para garantir que ocorresse a estabilização no peso do lisímetro após a adição ou remoção da massa.

Os dados obtidos na calibração foram submetidos ao coeficiente de determinação calculado em planilha eletrônica Microsoft Excel® para determinar a precisão, ao erro absoluto médio (Equação 1), ao erro quadrático médio (Equação 2) e ao índice de concordância (Equação 3) proposto por Willmott (1962) para determinar a acurácia. O índice de Willmott varia de 0 a 1, sendo 1 a máxima concordância dos valores estimados aos observados.

$$EAM = \frac{\sum |Y_{obs} - Y_{est}|}{n} \quad (1)$$

$$EQM = \frac{\sum (Y_{obs} - Y_{est})^2}{n} \quad (2)$$

$$d = 1 - \frac{\sum (Y_{obs} - Y_{est})^2}{\sum (|Y_{est} - \bar{Y}_{obs}| + |Y_{obs} - \bar{Y}_{obs}|)^2} \quad (3)$$

em que,

EAM - erro absoluto médio, mm;

EQM - erro quadrático médio, mm<sup>2</sup>;

n - número de observações, adimensional;

d - índice de concordância de Willmott, adimensional;

Yobs - massas equivalentes padrão utilizadas para calibração dos lisímetros, mm;

Yest - massas equivalentes obtidas na calibração dos lisímetros, mm, e

$\bar{Y}_{obs}$  - média de massas equivalentes padrão utilizadas para calibração dos lisímetros, mm.

Com o intuito de verificar a variabilidade na determinação de massa pela célula de carga entre adição e remoção de massa, o erro de histerese (H) foi calculado pela máxima diferença entre leituras de adição e remoção dos mesmos valores de massa (Equação 4). Para se comparar os erros dos dois sistemas de pesagem, a histerese foi expressa em percentual do fundo de escala (HFE), segundo a Equação 5.

$$H = |Y_{ad_i} - Y_{rem_i}| \quad (4)$$

$$HFE = \frac{|Y_{ad_i} - Y_{rem_i}|}{c} \times 100 \quad (5)$$

em que,

H - histerese, mm;

Yadi - massa equivalente obtida na calibração durante a adição de massa “i” nos lisímetros, kg;

Yremi - massa equivalente obtida na calibração durante a remoção de massa “i” nos lisímetros, kg;

HFE - histerese ao fundo de escala, %, e

C - capacidade da célula de carga, 43,4 mm.

As regressões obtidas na calibração dos três lisímetros foram submetidas ao teste de paralelismo e coincidência de retas pelo teste t, ao nível de significância de 5%, para verificação das diferenças de medição entre lisímetros e entre carga e descarga em cada lisímetro. Caso o teste t seja significativo para paralelismo, as retas não são consideradas paralelas e, da mesma maneira, caso o teste t seja significativo para coincidência, as retas não são consideradas coincidentes.

### **3.5 Teste dos lisímetros**

Após a calibração, foi realizado um teste de verificação da variação de massa nos lisímetros (M) para determinação de ETc e comparação com ETo.

Foram utilizadas bandejas com MPB da cultivar SP801816 com idade de 32 dias após o plantio (DAP), previamente selecionadas e produzidas de acordo com metodologia padrão do viveiro onde foi instalado o estudo. Esta metodologia foi fundamentada nas etapas de: (1) corte e seleção de minirrebolos; (2) plantio de minirrebolos em tubetes de 125 cm<sup>3</sup> contendo bagaço de cana previamente envelhecido; (3) cobertura dos minirrebolos com vermiculita e; (4) brotação dos minirrebolos em casa de vegetação climatizada (7 dias de permanência em temperatura de 30°C e umidade relativa de 90%). Três bandejas, contendo as mudas foram alocadas em cada lisímetro no dia 30 de setembro de 2016. As medidas foram realizadas em 1 e 2 de outubro de 2016.

### **3.6 Procedimentos experimentais**

Após a calibração e teste dos lisímetros, no dia 15 de novembro de 2016 houve o corte e transporte de colmos das três cultivares do estudo (CTC9005HP, RB966928 e SP87365) ao viveiro para obtenção das gemas em minirrebolos. O canavial de



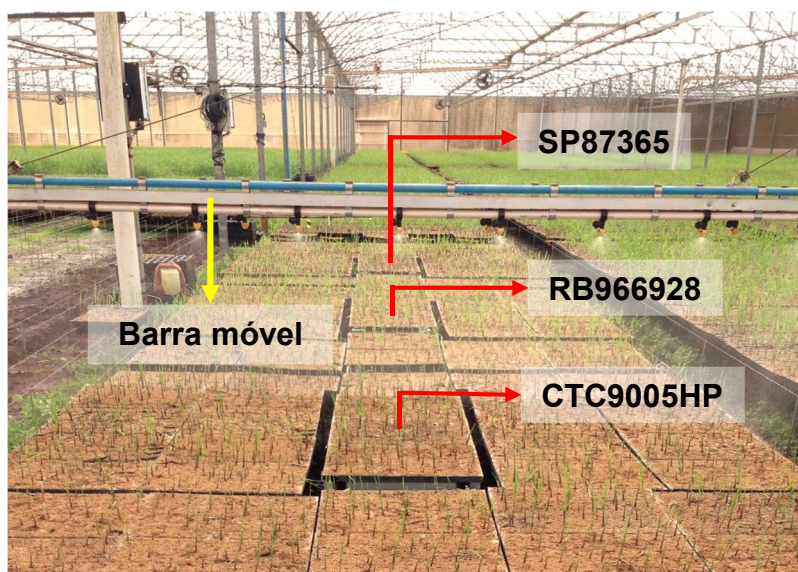
origem dos colmos apresentava elevada sanidade, garantida em amostragens de pragas e doenças, idade máxima de 8 meses e porte ereto. No dia 17 de novembro de 2016 realizou-se o processamento dos colmos para obtenção de minirrebolos. Este processo foi realizado por meio de despalha dos colmos, extração das gemas dos colmos em minirrebolos com 4 cm de comprimento, seleção de minirrebolos viáveis e tratamento fitossanitário de minirrebolos com fungicida (13,3 ml l<sup>-1</sup> de solução composta de 75 g l<sup>-1</sup> de Azoxistrobina, 37,5 g l<sup>-1</sup> de Metalaxil-M e 12,5 g l<sup>-1</sup> de Fludioxonil), inseticida (13,3 ml l<sup>-1</sup> de solução composta de 350 g l<sup>-1</sup> de Tiametoxan) e regulador de crescimento (5 ml l<sup>-1</sup> de solução composta de 0,05 g l<sup>-1</sup> de Ácido 4-indol-3-ilbutírico, 0,05 g l<sup>-1</sup> de ácido giberélico e 0,09 g l<sup>-1</sup> de cinetina). Em seguida, realizou-se o plantio dos minirrebolos em tubetes de 125 cm<sup>3</sup>, dispostos em 50 bandejas de 54 tubetes para cada tratamento, previamente preenchidos com substrato à base de bagaço de cana-de-açúcar e cobertos com camada de 2 cm de vermiculita superfina. A análise química do bagaço utilizado como substrato é descrita na Tabela 1.

**Tabela 1.** Análise química do bagaço de cana utilizado como substrato para produção das mudas.

MO	MM	U	C	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO	C/N	MO/MM	pH	Cu	Fe	Mn	Zn
----- % -----		----- g kg <sup>-1</sup> -----					-	-	(H <sub>2</sub> O)	----- ppm -----					
33,2	66,8	57,7	192,6	3,6	2,9	3,0	5,7	3,3	53,7	0,5	6,3	109,0	13108,8	184,0	60,0

C: carbono; MO: matéria orgânica; MM: matéria mineral; N: nitrogênio; U: umidade; MO/MM: relação entre matéria orgânica e matéria mineral; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: fósforo total; K<sub>2</sub>O: potássio; CaO: cálcio; MgO: magnésio; pH (H<sub>2</sub>O): potencial de hidrogênio em água; Cu: cobre; Fe: ferro; Mn: manganês; Zn: zinco. Laboratório de Solos – Usina São Martinho.

Após finalizar a etapa de plantio, as bandejas de cada tratamento foram acondicionadas em carrinhos, projetados para comportar 50 bandejas dispostas em 5 níveis de altura e 2 linhas, durante 10 dias em câmara de brotação com condições ambientais controladas de alta temperatura (33°C) e elevada umidade relativa (90%). Após este período, 38 bandejas com mudas brotadas de cada tratamento foram transferidas à casa de vegetação do estudo, sendo 3 bandejas de cada tratamento apoiadas sobre os lisímetros, seguindo a disposição da Figura 3, e mantidas durante 46 dias após a transferência (DAT) para avaliações de ET<sub>c</sub> e K<sub>c</sub>.



**Figura 3.** Tratamentos do estudo (CTC9005HP, RB966928 e SP87365) após transferência para os lisímetros da casa de vegetação sendo irrigados por barra móvel.

Aos 37 DAT foi realizada poda do excesso de folhas dos tratamentos, devido efeito guarda-chuva que dificultava que as lâminas de irrigação atingissem o substrato, mantendo a altura de 15 cm de folhas, a partir do ponto de inserção da bainha da última folha aberta ao colmo.

### 3.7 Avaliações

A evapotranspiração de cultura ( $ET_c$ ) foi determinada diariamente de acordo com a Equação 6.

$$ET_{C_x} = ARM_{x+1} - ARM_x + \sum_{i=1}^n L_{x_i} - \sum_{i=1}^n D_{x_i} \quad (6)$$

em que,

$ET_{C_x}$ : evapotranspiração de cultura no lisímetro no dia "x", mm;

$ARM_{x+1}$ : armazenamento de água no lisímetro à 0h no dia subsequente ao dia "x", mm;

$ARM_x$ : armazenamento de água no lisímetro à 0h no dia "x", mm;

$L_x$ : lâminas de irrigação no dia "x", mm, e

$D_x$ : drenagem no dia "x", mm.

A evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) foi estimada diariamente pela equação de Penman-Monteith, parametrizada pelo método FAO-56 (ALLEN et al., 1998), de acordo com a Equação 7.

$$ET_o = \frac{0,408 s (R_n - G) + \frac{\gamma 900 U_2 (e_s - e_a)}{T + 273}}{s + \gamma (1 + 0,34 U_2)} \quad (7)$$

em que,

ET<sub>o</sub>: evapotranspiração de referência, mm d<sup>-1</sup>;

s: declividade da curva de pressão de vapor na temperatura do ar, kPa °C<sup>-1</sup>;

R<sub>n</sub>: radiação líquida total diária, MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>;

G: fluxo de calor no solo, MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> (sendo desprezível para valores diários);

γ: constante psicrométrica, 0,063 kPa °C<sup>-1</sup>;

U<sub>2</sub>: velocidade do vento a 2 m, m s<sup>-1</sup>;

e<sub>s</sub>: pressão de saturação de vapor, kPa;

e<sub>a</sub>: pressão parcial de vapor, kPa, e

T: temperatura média do ar, °C.

Os valores de coeficiente de cultura (K<sub>c</sub>) foram estimados pela relação entre ET<sub>c</sub> e ET<sub>o</sub> ao longo do ciclo da cultura, de acordo com a Equação 8.

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_o} \quad (8)$$

em que,

K<sub>c</sub>: coeficiente de cultura, adimensional;

ET<sub>c</sub>: evapotranspiração de cultura, mm d<sup>-1</sup>, e

ET<sub>o</sub>: evapotranspiração de referência, mm d<sup>-1</sup>.

A fim de relacionar os valores de K<sub>c</sub> com unidades térmicas, estimou-se os valores de graus-dia (°C), segundo metodologia proposta por Ometto (1981), de acordo com a Equação 9.

$$\text{Se } T_m > T_b \text{ e } T_M < T_B, \text{ então: } GD = \left( \frac{T_M - T}{2} \right) + (T_m - T_b);$$

ou

Se  $T_m \leq T_b < T_M$  e  $T_M < T_B$ , então:  $GD = \frac{(T_M - T_m)^2}{2(T_M - T_m)}$ ;

ou

Se  $T_M < T_b$  e  $T_M < T_B$  então:  $GD = 0$ ; (9)

ou

Se  $T_m > T_b$  e  $T_M > T_B$  então:  $GD = (T_m - T_b) + \frac{1}{2} \left[ \frac{(T_M - T_m)^2 - (T_M - T_B)^2}{T_M - T_m} \right]$ ;

ou

Se  $T_m < T_b$  e  $T_M > T_B$  então:  $GD = \frac{1}{2} \left( \frac{(T_M - T_b)^2 - (T_M - T_m)^2}{T_M - T_m} \right)$ .

em que,

GD: graus-dia, °C d<sup>-1</sup>;

TM: temperatura máxima diária, °C;

Tm: temperatura mínima diária, °C;

TB: temperatura basal superior da cana-de-açúcar, °C, e

Tb: temperatura basal inferior da cana-de-açúcar, °C.

Segundo Barbieri, Bacchi e Villa Nova (1979), o crescimento ótimo da cana-de-açúcar é obtido com temperatura média diária entre 22 a 30°C e a taxa de crescimento se reduz com temperatura abaixo de 20°C, sendo esta a temperatura basal inferior para a cultura. Por outro lado, temperatura acima de 38°C, ocasiona crescimento muito lento, tornando-se praticamente nulo (FAUCONNIER; BASSEREAU, 1975; BARBIERI; BACCHI; VILLA NOVA, 1979). Desta forma, considerou-se a temperatura basal superior e inferior de 38°C e 20°C, respectivamente.

As avaliações de crescimento foram realizadas em 10 plantas amostradas aleatoriamente, sendo 2 plantas de cada uma das 5 unidades experimentais, de cada tratamento aos 7, 14, 21, 28 e 41 DAT.

A área foliar (AF) foi determinada pela área foliar média (AF<sub>med</sub>) das plantas amostradas em cada tratamento e data de amostragem. A medida de área foliar de cada planta amostrada foi realizada por meio de imagens digitalizadas de suas folhas, destacadas na região de inserção da bainha ao colmo e coladas com fita dupla-face em papel cartolina branco (500 mm x 660 mm) com escala (régua milimétrica de 15 cm). As imagens foram capturadas com auxílio de câmera digital (Cyber Shot DSC-WX50 16.2 Mega Pixels, Sony Corporation, Kanto, Tokyo, Japan) e processadas no

Software ImageJ® (ImageJ 1.51 h, National Institute of Mental Health, Maryland, Bethesda, USA), aplicando procedimentos de contraste e comparação de cores.

Cada folha teve seu comprimento e largura aferidos por régua milimétrica de 50 cm, com a finalidade de se obter correlação entre AF medida via Software ImageJ® e área foliar estimada ( $AF_{EST}$ ) pelo produto entre comprimento e largura de folhas ( $C \times L$ ).

As aferições de massa foram realizadas em balança analítica de precisão 0,0001 g (Denver Instrument Company AA-200), sendo massa fresca de folhas (MFF) e de colmos (MFC) aferidas imediatamente após se destacar as folhas e colmos das plantas amostradas e massa seca de folhas (MSF) e de colmos (MSC) após manter os materiais em estufa de circulação forçada de ar a 60°C, durante 48 h. A diferença entre massa fresca e massa seca representou a umidade presente nos tecidos vegetais, conforme Equação 10.

$$UX = \frac{MFX - M}{MFX} \quad (10)$$

em que,

UX – umidade de folhas, colmos ou total, %,

MFX – massa fresca de folhas, colmos ou total, g, e

MSX – massa seca de folhas, colmos ou total, g.

A altura de colmos (AC) foi determinada pelo comprimento, medido por régua milimétrica de 50 cm, da base do colmo, logo acima do substrato, até a região de inserção da bainha ao colmo da última folha aberta (folha +1), segundo classificação de Kuijper (DILLEWIJN, 1952).

O diâmetro de colmos (DC) foi determinado pela espessura do colmo, na região logo acima do substrato, medida por paquímetro digital com exatidão de 0,03 mm (200MM/8 Digimess Instrumentos de Precisão Ltda., São Paulo, SP, Brasil).

A análise de crescimento foi determinada por meio do índice de área foliar (IAF), taxa de assimilação líquida (TAL), taxa de crescimento relativo (TCR), taxa de crescimento da cultura (TCC), taxa de crescimento absoluto (TCA), razão de área foliar (RAF), área foliar específica (AFE) e razão de massa de folhas (RMF), segundo

as Equações 11 a 18, recomendadas por Alvarenga, Nery e Rodrigues (2015) e Cairo, Oliveira e Mesquita (2008).

$$IAF = \frac{AF_{med} \times n}{AL} \quad (11)$$

$$TAL = \frac{M_2 - M_1}{A_2 - A_1} \times \frac{\ln A_2 - \ln A_1}{t_2 - t_1} \quad (12)$$

$$TCR = \frac{\ln M_2 - \ln M_1}{t_2 - t_1} \quad (13)$$

$$TCC = TAL \times IAF \quad (14)$$

$$TCA = \frac{M_2 - M_1}{A_2 - A_1} \quad (15)$$

$$RAF = \frac{AF}{MST} \quad (16)$$

$$AFE = \frac{AF}{MSF} \quad (17)$$

$$RMF = \frac{MSF}{MST} \quad (18)$$

em que,

IAF – índice de área foliar, adimensional,

TAL – taxa de assimilação líquida, g dm<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>,

TCR – taxa de crescimento relativo, g g<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>,

TCC – taxa de crescimento da cultura, g dm<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>,

RAF – razão de área foliar, dm<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>,

AFE – área foliar específica, dm<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>,

RMF – razão de massa de folhas, g g<sup>-1</sup>,

M<sub>2</sub> e M<sub>1</sub> – massa seca total de duas amostragens sucessivas, g,

A<sub>2</sub> e A<sub>1</sub> – área foliar de duas amostragens sucessivas, dm<sup>2</sup>,

t<sub>2</sub> e t<sub>1</sub> – intervalo de tempo entre duas amostragens sucessivas, d,

AF<sub>med</sub> – média de área foliar das plantas amostradas, dm<sup>2</sup>,

n – número de plantas por lisímetro, 162,

AL – área do lisímetro, dm<sup>2</sup>,

MSF – massa seca de folhas, g, e

MST – massa seca total, g.

A eficiência final de uso de água foi contabilizada pela razão entre matéria vegetal das 162 plantas contidas em cada lisímetro e evapotranspiração de cultura

total da cultura na área do lisímetro, de acordo com Equação 19, adaptada de Lima et al. (2011).

$$EUA_X = \frac{M_X}{ET_c} \times 10^{-3} \quad (19)$$

em que,

$EUA_X$  – eficiência de uso de água de determinada matéria vegetal “X”,  $\text{kg m}^{-3}$ ,

$M_X$  – matéria vegetal “X”,  $\text{kg m}^{-2}$ ,

$ET_c$  – evapotranspiração total de cultura durante o período experimental, mm, e

$10^{-3}$  – fator de conversão de unidade de evapotranspiração de mm para m.

O índice de cobertura de folhas dos lisímetros (IC) foi determinado pela razão entre a área do lisímetro coberta por folhas ( $AL_F$ ) pela área do lisímetro total ( $AL_T$ ), de acordo com a Equação 20, aos 7, 14, 21, 28 e 41 DAT. Para isso, imagens aéreas digitalizadas dos lisímetros foram capturadas por câmera digital (Cyber Shot DSC-WX50 16.2 Mega Pixels, Sony Corporation, Kanto, Tokyo, Japan) e processadas no aplicativo de celular Canopeo® (PATRIGNANI; OCHSNER, 2015).

$$IC = \frac{AL_F}{AL_T} \times 100 \quad (20)$$

em que,

IC: índice de cobertura de folhas do lisímetro, %;

$AL_F$ : área do lisímetro coberta por folhas,  $\text{cm}^2$ , e

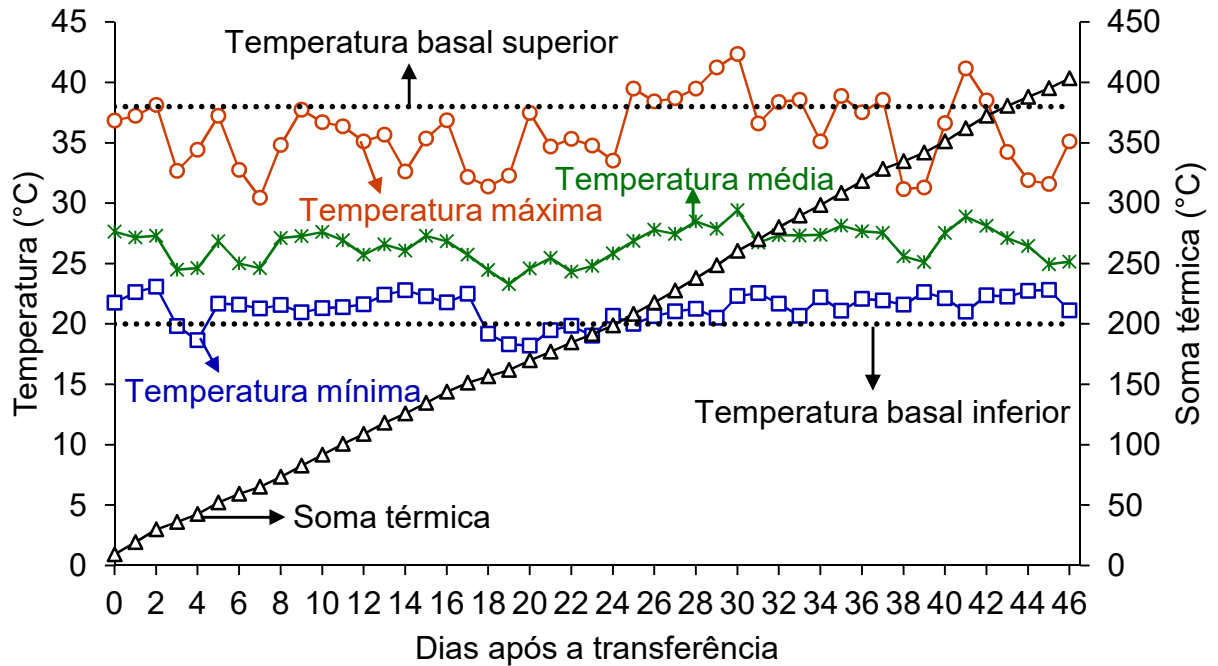
$AL_T$ : área do lisímetro total,  $\text{cm}^2$ .

Os resultados de análise de crescimento foram submetidos à análise estatística do teste de Tukey pelo programa AgroEstat ao nível de significância de 1%. Os resultados provenientes de cálculos não foram analisados estatisticamente, visto que não se pode afirmar que obedecem aos pressupostos básicos deste tipo de análise (BARBOSA; MALDONADO JÚNIOR, 2015).

### 3.8 Condições meteorológicas e irrigação

No período de estudo, a temperatura média do ar foi  $26,5^\circ\text{C}$ , a média das temperaturas máximas foi  $35,2^\circ\text{C}$  e a média das temperaturas mínimas foi  $20,9^\circ\text{C}$ . Em

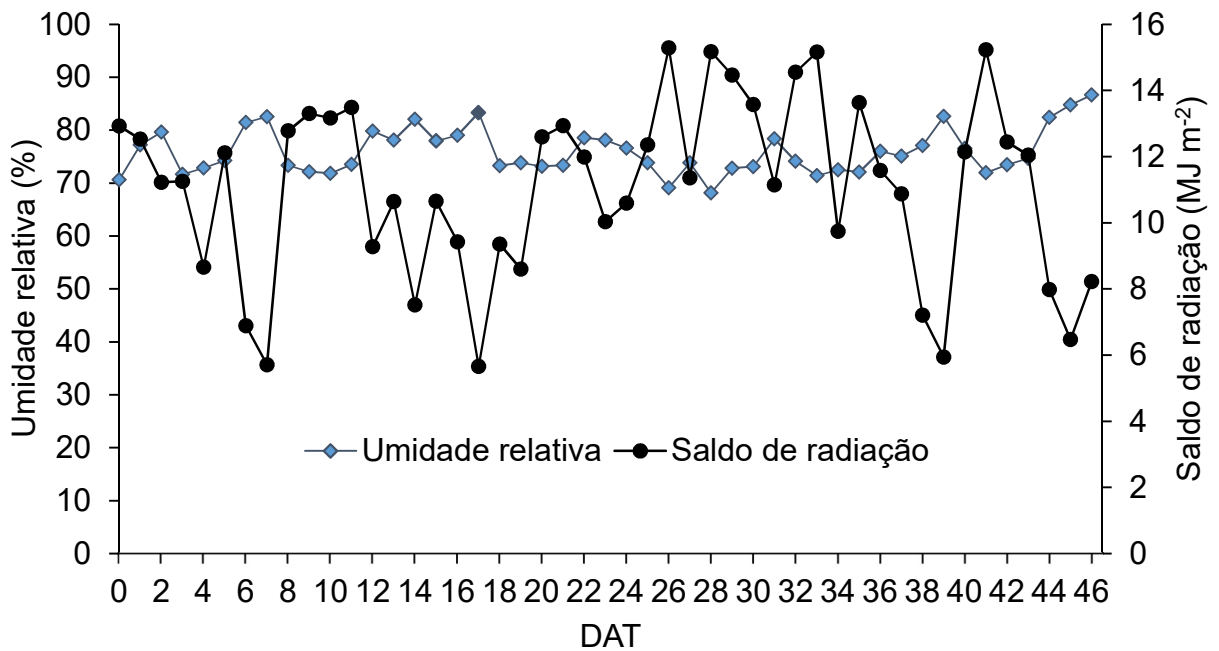
13 dias do ciclo a temperatura máxima superou a temperatura basal superior (38°C) e em 8 dias a temperatura mínima foi inferior à temperatura basal inferior (20°C). Ao final do período experimental a soma térmica atingiu 403,4°C (Figura 4).



**Figura 4.** Temperaturas média, máxima e mínima do ar, temperaturas base e soma térmica no período experimental.

A umidade relativa média do ar foi 75,9%, com variação de 68,2 a 86,7%. O saldo de radiação médio foi  $11,1 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , com variação de 5,7 a  $15,3 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  (Figura 5). A radiação global média foi  $15,2 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , com variação de 8,2 a  $20,7 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ . A velocidade média do vento a 2 metros do solo foi  $0,271 \text{ m s}^{-1}$ , com variação de 0,024 a  $0,912 \text{ m s}^{-1}$ .

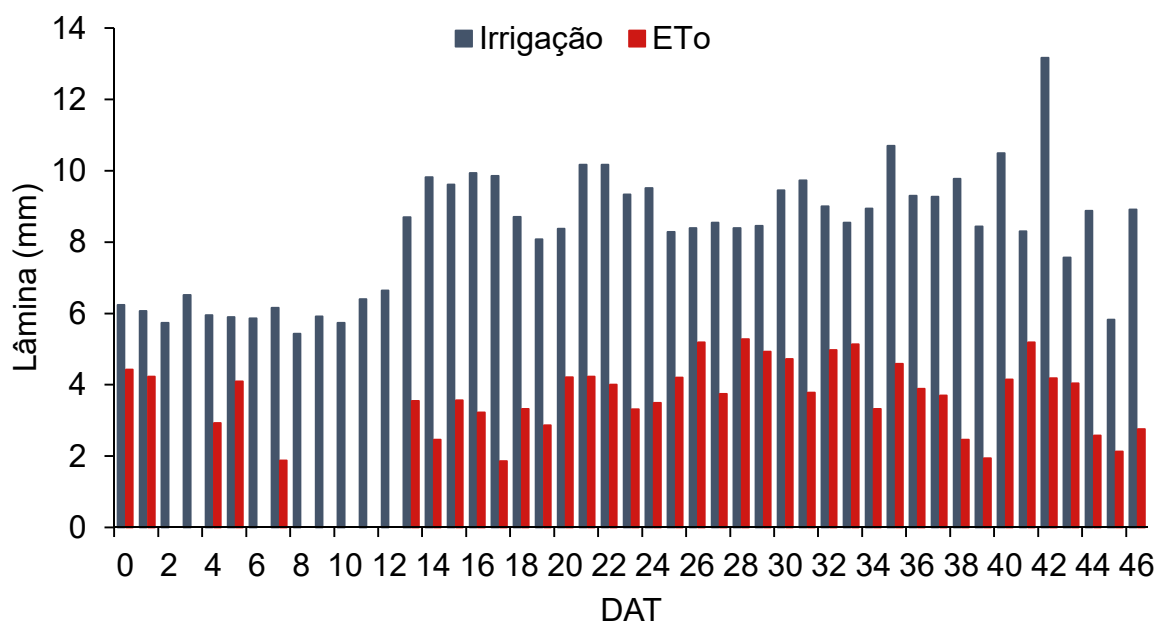




**Figura 5.** Umidade relativa e saldo de radiação no período experimental. DAT – dias após a transferência.

Utilizou-se o método de aspersão para irrigação, por meio de barra irrigadora com 14 m de largura, composta por 33 bicos (TT TEEJET 11008VS, TeeJet, Springfield, Illinois, USA), espaçados em 430 mm e a 1,5 m do solo. A velocidade da barra determinou a lâmina de água aplicada, sendo que a vazão era fixa em  $2,6 \text{ l min}^{-1} \text{ bico}^{-1}$  e a velocidade limitada em  $8 \text{ m min}^{-1}$ , proporcionando aplicação de lâminas superiores a 0,67 mm a cada passada.

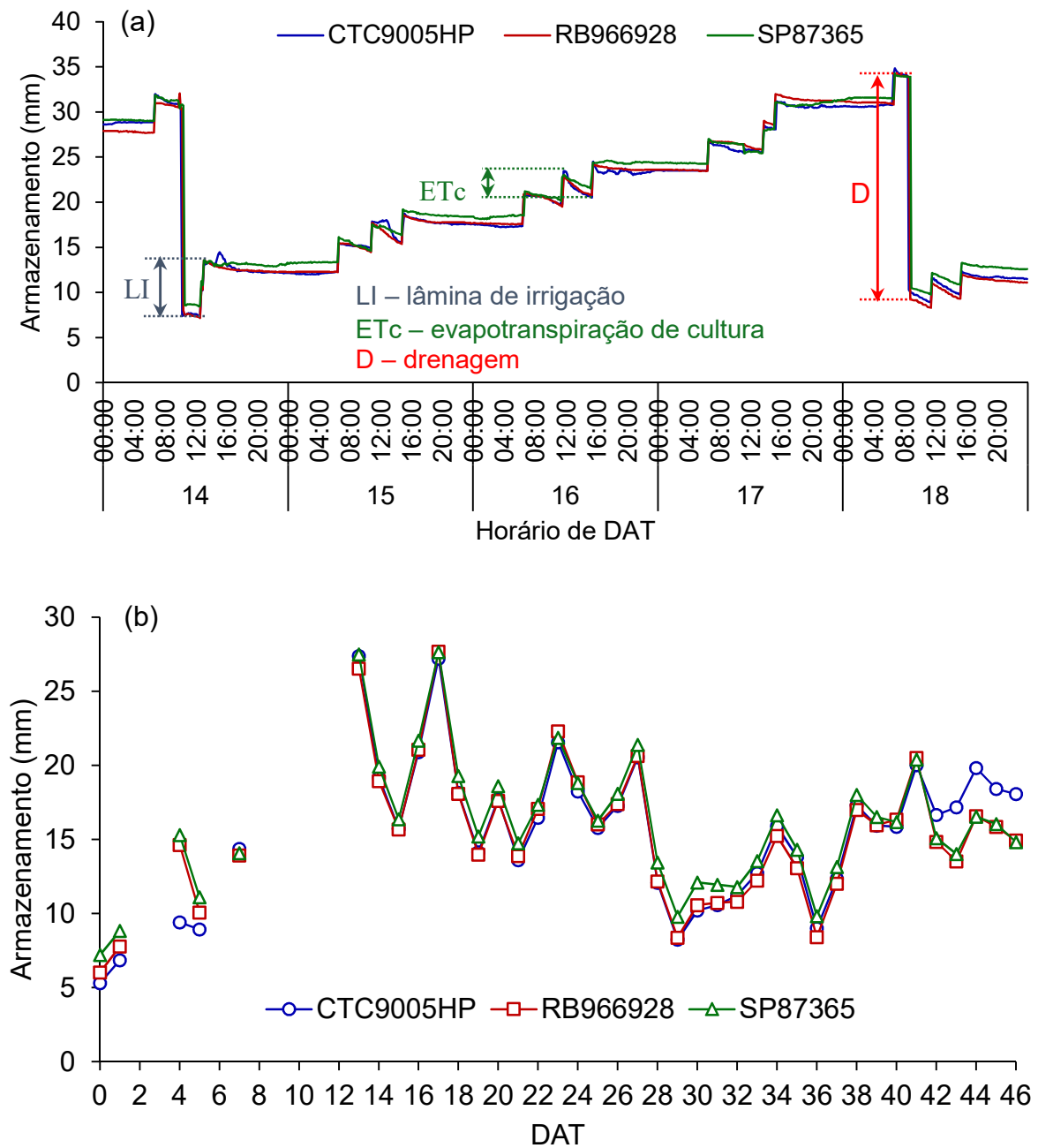
A somatória de lâminas de irrigação foi 389,2 mm, com média de  $8,3 \text{ mm d}^{-1}$  e variação de 5,4 a  $13,2 \text{ mm d}^{-1}$ . Não houve déficit hídrico durante a condução do experimento, visto que as lâminas de irrigação foram superiores à ETo (Figura 6).



**Figura 6.** Lâminas de irrigações e evapotranspiração de referência (ETo) no período experimental. DAT – dias após a transferência.

Caso houvesse ocorrência de evapotranspiração (ET) menor ou igual à lâmina de irrigação haveria indício de ocorrência de deficiência hídrica e, portanto, a ET seria a real da cultura (ETr). O estudo de Kc dos cultivos exige que a ET seja máxima (ETc), pois, caso contrário, o Kc fica abaixo de seu potencial e, portanto, considera deficiência hídrica. A soma de ETo foi 175,7 mm, com média de 3,7 mm d<sup>-1</sup> e variação de 1,9 a 5,3 mm d<sup>-1</sup>.

O armazenamento de água do lisímetro incluiu a umidade no substrato dos tubetes e a água de drenagem contida em seu tanque, visto que a drenagem foi realizada quando o nível da água se aproximava da base dos tubetes. A variação de armazenamento revelou sensibilidade e uniformidade dos lisímetros às variações de massa em intervalos horários e diários e o efeito da drenagem (Figura 7). No período de 2, 3, 6 e 8 a 12 DAT houve falha de dados devido a problemas elétricos na comunicação entre datalogger e lisímetros.

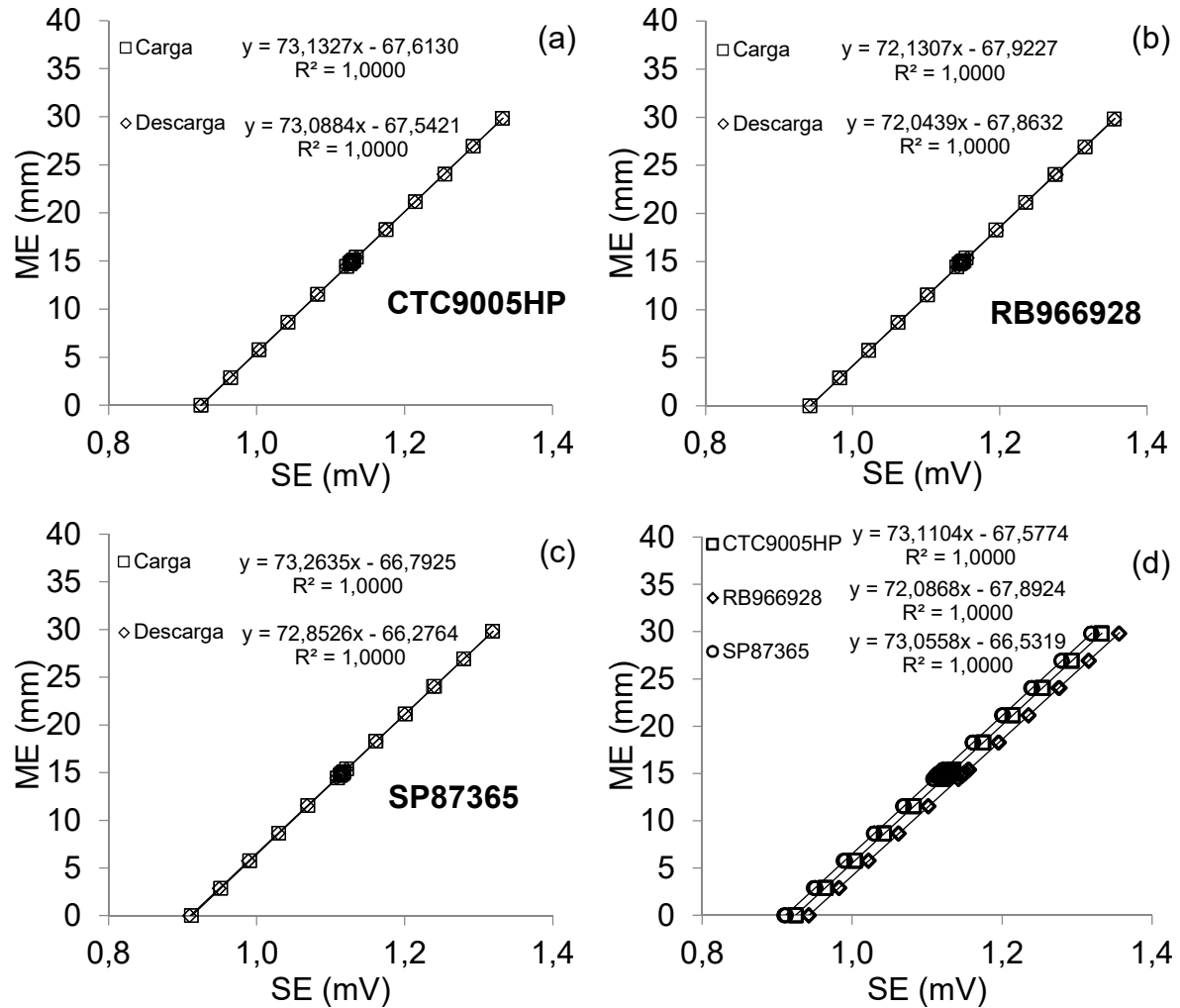


**Figura 7.** Armazenamento de água horário dos 14 aos 18 DAT (a) e diário durante o período experimental (b) dos tratamentos (CTC9005HP, RB966928 e SP87365). DAT – dias após a transferência.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Lisímetros

A calibração dos três lisímetros apresentou elevada correlação ( $R^2 = 1,0000$ ) entre massa equivalente em mm e sinal elétrico, evidenciando alta precisão na medição dos equipamentos. A análise dos resultados demonstrou elevada homogeneidade nas características de pesagem entre lisímetros, com valores de coeficiente angular (a) da regressão linear variando de 72,0868 mm  $mV^{-1}$  a 73,1104 mm  $mV^{-1}$ , ou seja, variação de 1,0236 mm  $mV^{-1}$ . Do mesmo modo, a variação deste coeficiente entre carga e descarga foi de 0,0443 mm  $mV^{-1}$  para o Lisímetro CTC9005HP, 0,0868 mm  $mV^{-1}$  para o Lisímetro RB966928 e 0,4109 mm  $mV^{-1}$  para o Lisímetro SP87365 (Figura 8). Estas variações foram menores àquelas encontradas por MARIANO et al. (2015), devido à menor capacidade das células de carga utilizadas pelos autores. O coeficiente da regressão linear (b) variou de -66,5319 mm a -67,8924 mm, ou seja, diferença de 1,3605 mm, podendo ser atribuída às diferenças em pesos mortos de cada lisímetro. O erro absoluto médio variou de 0,0272 mm a 0,0382 mm, inferior aos encontrados por Mariano et al. (2015), Nascimento et al. (2011), Howell et al. (1995), Allen e Fischer (1991) e Faria, Campeche e Chibana (2006) e semelhante ao de Campeche (2002). O erro quadrado médio variou de 0,0011 mm<sup>2</sup> a 0,0024 mm<sup>2</sup>, podendo-se concluir que os lisímetros são de alta acurácia. Além disso, a acurácia na medição de massa equivalente em mm também foi comprovada pelo índice de concordância de Willmott (d) (WILLMOTT et al., 1985) que apresentou valores de 1,0000 para os três lisímetros (Tabela 2), resultado semelhante ao observado por Mariano et al. (2015). O valor máximo de histerese de 0,1951 mm e histerese ao fundo de escala de 0,4492% verificados no Lisímetro SP87365 não comprometem as avaliações de massa equivalente em mm nos três lisímetros do estudo. Portanto, os equipamentos são adequados às avaliações de ETC de MPB com precisão e acurácia em torno de 0,1 mm, a qual é adequada às aplicações em cultivo protegido.



**Figura 8.** Relação entre massa equivalente (ME) e sinal elétrico (SE) para carga e descarga do Lisímetro CTC9005HP (a), Lisímetro RB966928 (b), Lisímetro SP87365 (c) e para valores conjuntos de carga e descarga nos três diferentes lisímetros (d).

O teste de paralelismo e coincidência de retas entre lisímetros demonstrou, pelo teste t ao nível de significância de 5%, paralelismo apenas entre os coeficientes angulares do Lisímetro CTC9005HP e Lisímetro SP87365 e, coincidência entre os coeficientes lineares do Lisímetro CTC9005HP e Lisímetro RB966928. Sendo assim, variações equivalentes de massa entre o Lisímetro CTC9005HP e Lisímetro SP87365 correspondem à mesma amplitude de variações de sinal elétrico, enquanto que a massa inicial dos lisímetros vazios, descrita por “peso morto” foram iguais entre o Lisímetro CTC9005HP e Lisímetro SP87365. Portanto, há necessidade de utilização de regressões de calibração próprias para cada lisímetro, visto que há características

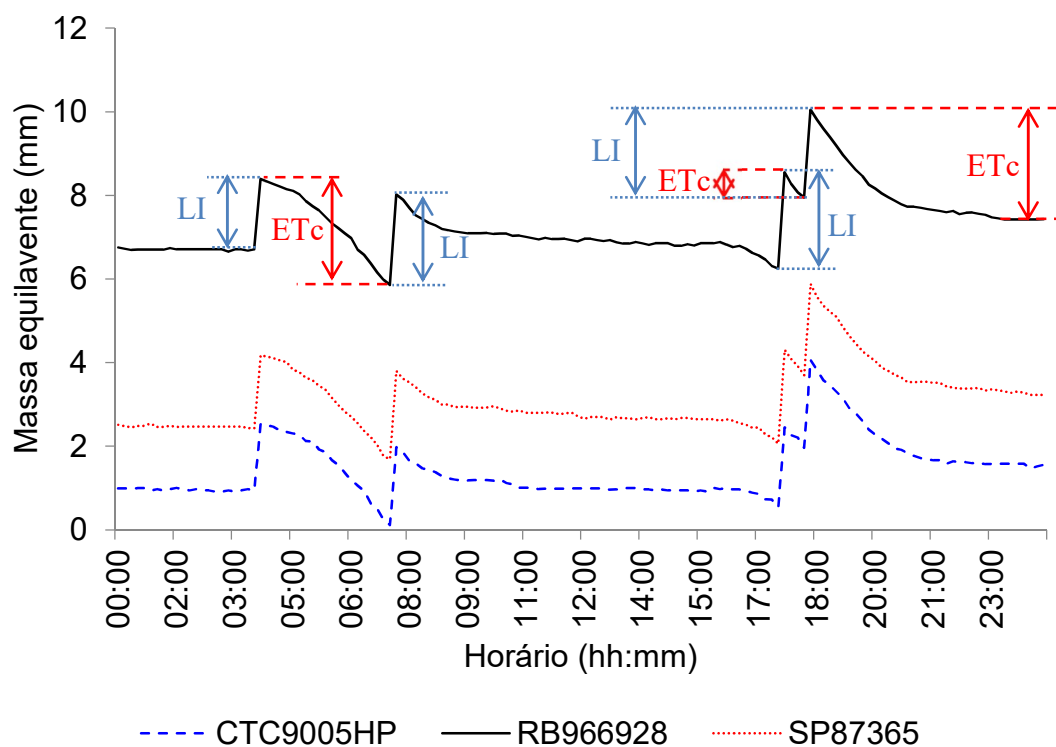
particularidades desenvolvidas durante a construção e instalação dos equipamentos que os tornam diferentes entre si.

O teste de paralelismo e coincidência de retas entre carga e descarga para cada lisímetro verificou, pelo teste t ao nível de significância de 5%, falta de paralelismo apenas no Lisímetro SP87365, demonstrando efeito diferenciado na detecção de variações de massa entre carga e descarga deste lisímetro, enquanto que houve coincidência entre carga e descarga nos três lisímetros.

**Tabela 2.** Coeficientes da regressão linear da reta  $y = ax + b$  entre massa equivalente (y, em mm) e sinal elétrico (x, em mV), coeficiente de determinação ( $R^2$ ), erro absoluto médio (EAM), erro quadrático médio (EQM), índice de Willmott (d), histerese (H) e histerese ao fundo de escala (HFE) da calibração dos três lisímetros.

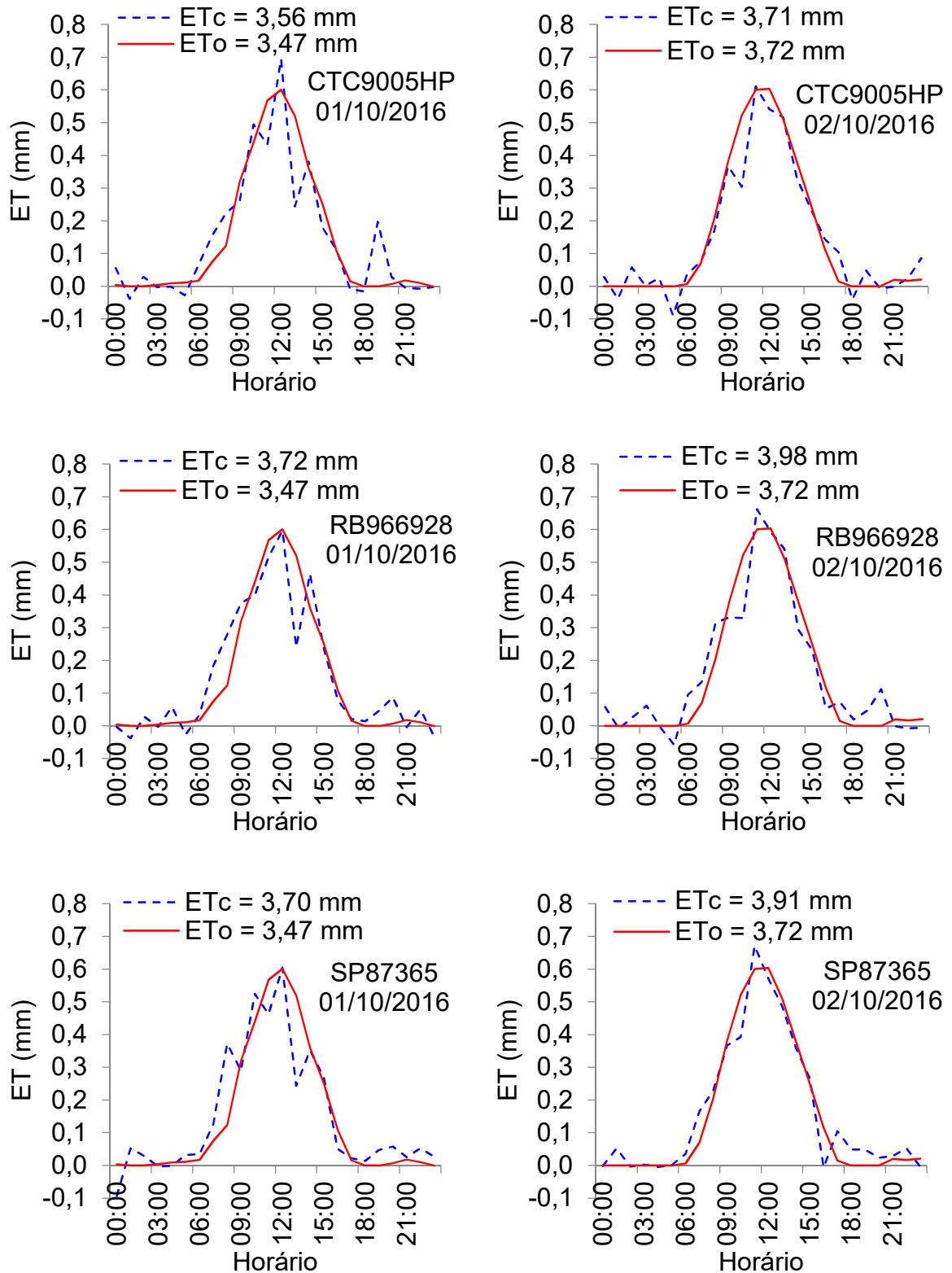
Lisímetro	a	b	$R^2$	EAM (mm)	EQM (mm <sup>2</sup> )	d	H (mm)	HFE (%)
CTC9005HP	73,1104	-67,5774	1,0000	0,0272	0,0011	1,0000	0,1260	0,2901
RB966928	72,0868	-67,8924	1,0000	0,0330	0,0017	1,0000	0,1649	0,3798
SP87365	73,0558	-66,5319	1,0000	0,0382	0,0024	1,0000	0,1951	0,4492

Nos dois dias de teste de avaliação dos lisímetros ocorreram dois eventos de irrigação, no dia 01/10/2016 (7h40min e 14h40min), assim como no dia 02/10/2016 (10h40min e 12h00min). Estes eventos de irrigação promoveram acréscimo na ME dos lisímetros, enquanto que ETc causou decréscimo na ME dos lisímetros, principalmente no momento de maior demanda atmosférica do dia (11h às 13h) (Figura 9).



**Figura 9.** Massa equivalente (mm) registrada pelos três lisímetros durante o período de teste, com destaque para lâminas de irrigação (LI) e evapotranspiração de cultura (ETc).

A ETc do primeiro dia de teste (01/10/2016) totalizou 3,56 mm para o Lisímetro CTC9005HP, 3,72 mm para o Lisímetro RB966928 e 3,70 mm para o Lisímetro SP87365, apresentando variação de 0,16 mm entre lisímetros. A ETo neste dia, calculada pelo método de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998), gerou um valor de 3,47 mm. Quanto ao segundo dia de teste (02/10/2016) a ETc totalizou um valor de 3,71 mm para o Lisímetro CTC9005HP, 3,98 mm para o Lisímetro RB966928 e 3,91 mm para o Lisímetro SP87365, gerando variação de 0,27 mm entre lisímetros, enquanto que a ETo neste dia gerou um valor de 3,72 mm (Figura 10).



**Figura 10.** Valores horários de evapotranspiração de cultura (ET<sub>c</sub>) e evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub> – Penman-Monteith) para os três lisímetros durante o teste.



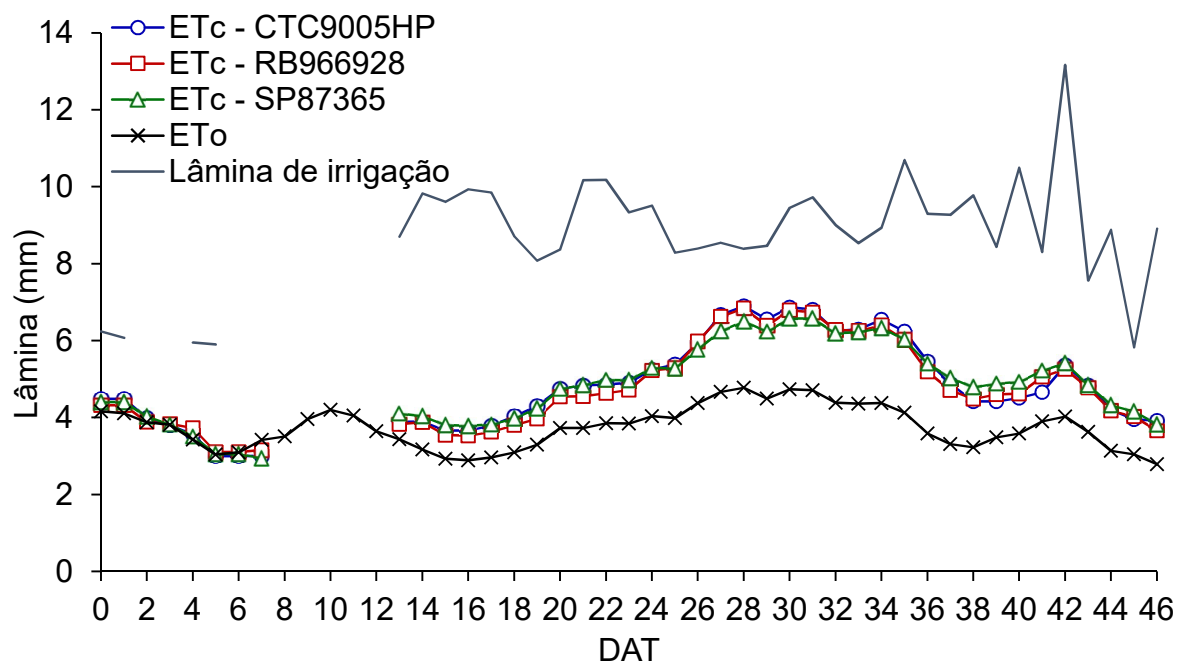
Com exceção do sistema de aquisição de dados, o custo dos materiais utilizados na confecção do lisímetros pode ser considerado baixo, totalizando R\$ 1.685,80. O sistema de aquisição de dados utilizados na pesquisa foi orçado em R\$ 10.938,00, correspondente a 86,6% do custo total (Tabela 3). O custo deste componente pode ser atenuado com a utilização de equipamentos alternativos disponíveis no mercado.

**Tabela 3.** Custos de construção e instalação de cada lisímetro de pesagem.

Material	Quantidade	Valor unitário (R\$)	Valor total (R\$)
Mão de obra	1	204,60	204,60
Estrutura de aço-carbono	1	165,00	165,00
Registro de esfera aço-carbono 1/2"	1	21,00	21,00
Indicador de nível de líquidos	1	32,00	32,00
Célula de carga (GL-30)	3	266,20	798,60
Caixa de junção (413 A)	1	464,60	464,60
Sistema de aquisição de dados	1	10.938,00	10.938,00
Total	-	-	12.623,8

#### 4.2 Determinação da evapotranspiração e coeficiente de cultura

Valores diários de  $ET_c$  para cada tratamento, obtidos pela média móvel entre 5 valores (valor de determinado DAT, 2 valores antecessores e 2 valores sucessores) são demonstrados na Figura 11.



**Figura 11.** Evapotranspiração de cultura (ETc) dos tratamentos (CTC9005HP, RB966928 e SP87365), evapotranspiração de referência (ETo) e irrigação no período experimental. DAT – dias após a transferência.

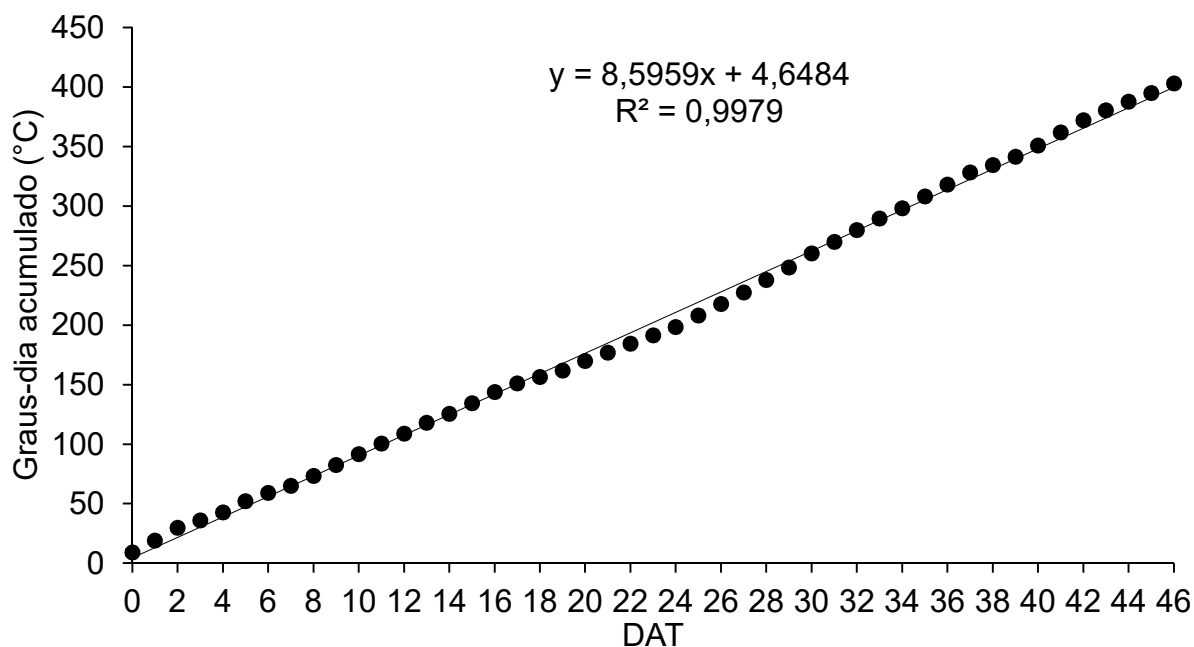
No início do ciclo (0 a 7 DAT), a ETc dos tratamentos se manteve próxima a ETo e sofreu redução em seus valores, fato que se deve principalmente ao decréscimo de temperatura e saldo de radiação. Após este período, houve intenso crescimento das mudas, evidenciado pelo aumento de IAF, com distanciamento de ETc dos tratamentos de ETo. Estas explicações resultam na curva de crescimento de Kc, visto que o crescimento das plantas acarreta em maior área de folhas e, portanto, maior superfície evaporativa.

A somatória de ETc do tratamento CTC9005HP foi 190,0 mm, com média de 4,9 mm d<sup>-1</sup> e variação de 3,0 a 6,9 mm d<sup>-1</sup>, enquanto que para RB966928 foi 187,3 mm, com média de 4,8 mm d<sup>-1</sup> e variação de 3,1 a 6,8 mm d<sup>-1</sup> e para SP87365 foi 190,6 mm, com média de 4,9 mm d<sup>-1</sup> e variação de 2,9 a 6,6 mm d<sup>-1</sup> (Tabela 4 e Figura 11).

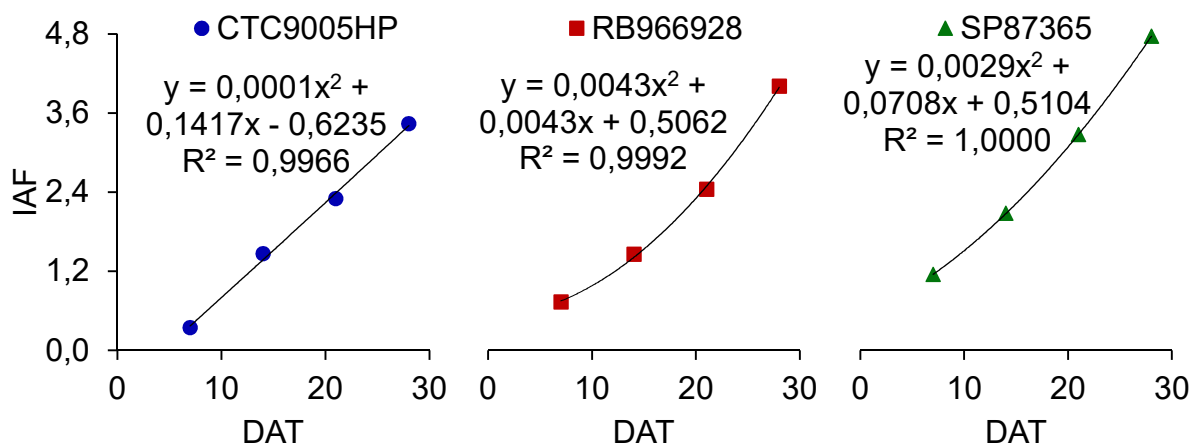
**Tabela 4.** Evapotranspiração de cultura (ETc) dos tratamentos (CTC9005HP, RB966928 e SP87365) e evapotranspiração de referência (ETo) no período experimental. DAT – dias após a transferência.

DAT	ETo (mm d <sup>-1</sup> )	ETc (mm d <sup>-1</sup> )		
		CTC9005HP	RB966928	SP87365
0-7	3,5	3,6	3,6	3,6
8-16	3,2	3,9	3,9	4,0
17-21	3,3	4,3	4,0	4,2
22-26	4,0	5,2	5,2	5,3
27-31	4,5	6,6	6,4	6,2
32-36	4,4	6,6	6,4	6,3
37-41	3,5	4,4	4,6	4,9
42-46	3,1	4,2	4,2	4,3
Média	3,7	4,9	4,8	4,9
Somatória	144,5	190,0	187,3	190,6

O modelo de graus-dia (GD) proposto por Ometto (1981) e de índice de área foliar (IAF) apresentaram elevada correlação ( $R^2 > 0,99$ ) linear e quadrática, respectivamente, quando colocados em função de DAT (Figura 12 e 13), podendo ser utilizados para a determinação de Kc.

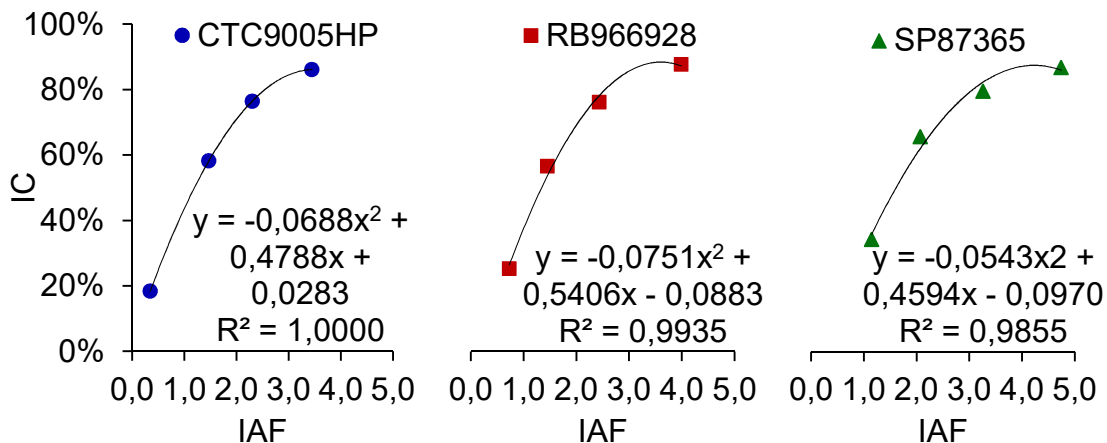


**Figura 12.** Graus-dia acumulado no período experimental. DAT – dias após a transferência.



**Figura 13.** Índice de área foliar (IAF) no período experimental. DAT – dias após a transferência.

A estimativa de IAF pelo IC apresentou elevada correlação quadrática ( $R^2 > 0,98$ ) (Figura 14), podendo ser utilizada na determinação do estágio de desenvolvimento de MPB, com vantagem de apresentar maior facilidade de obtenção de dados quando comparado às avaliações de IAF.



**Figura 14.** Índice de cobertura (IC) dos tratamentos (CTC9005HP, RB966928 e SP87365) em função de índice de área foliar (IAF).

A poda realizada aos 37 DAT ocasionou mudanças nos parâmetros de  $ET_c$ , IAF, IC e, conseqüentemente, Kc. A  $ET_c$  dos tratamentos CTC9005HP, RB966928 e SP87365 antes da poda (32 a 36 DAT) era de 6,6, 6,4 e 6,3  $\text{mm d}^{-1}$ , respectivamente, e passou a 4,4, 4,6 e 4,9  $\text{mm d}^{-1}$  após a poda (37 a 41 DAT), respectivamente. Ocorreu

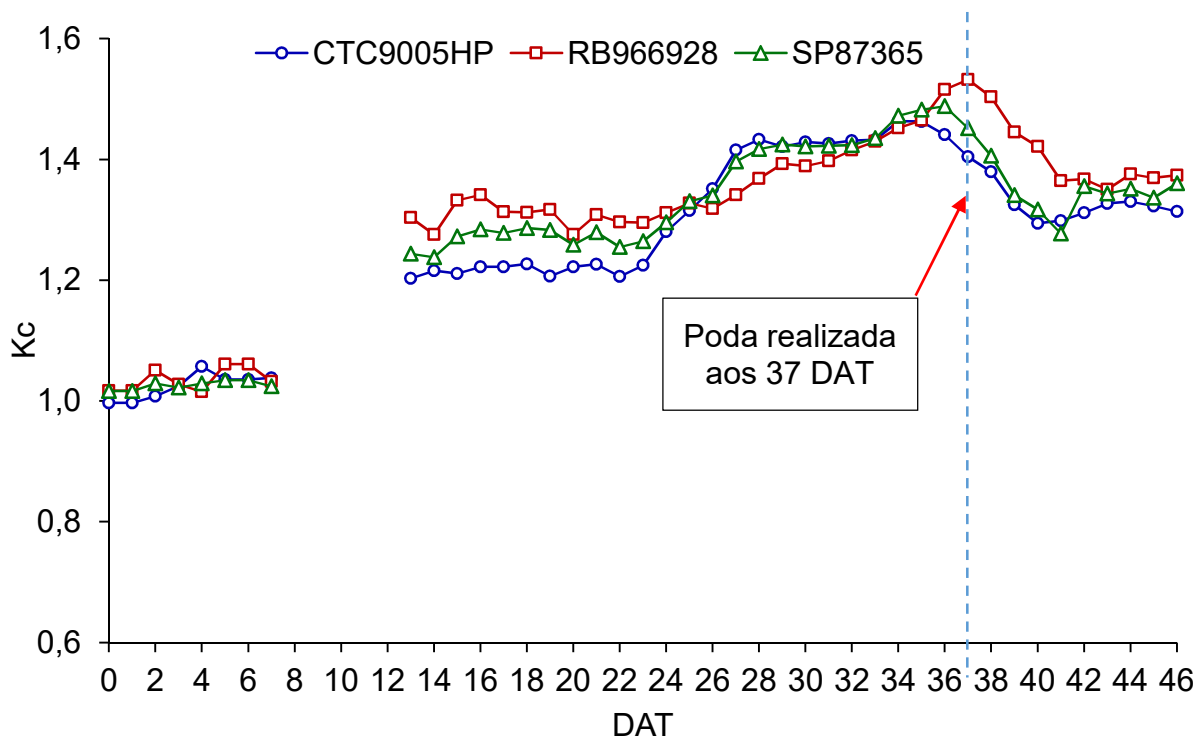
decréscimo na taxa de evapotranspiração, pois a poda é um processo mecânico de redução da área foliar e, portanto, reduz a superfície de transpiração das plantas.

O coeficiente de cultura (Kc) dos tratamentos no início do ciclo (0 a 7 DAT) apresentou valores próximos à 1,00, demonstrando elevada evapotranspiração, mesmo se tratando de mudas. Os valores máximos de Kc foram obtidos entre 32 e 36 DAT, sendo 1,50 para CTC9005HP, 1,46 para RB966928 e 1,45 para SP87365 (Tabela 5).

**Tabela 5.** Índice de área foliar (IAF), índice de cobertura (IC) e coeficiente de cultura (Kc) dos tratamentos (CTC9005HP, RB966928 e SP87365) e soma térmica no período experimental. DAT – dias após a transferência.

DAT	Soma térmica (°C)	CTC9005HP			RB966928			SP87365		
		IAF	IC (%)	Kc	IAF	IC (%)	Kc	IAF	IC (%)	Kc
0-7	65	0,4	19,1	1,02	0,7	25,5	1,02	1,1	34,8	1,04
8-16	144	1,7	64,2	1,22	1,7	63,0	1,22	2,4	70,1	1,28
17-21	177	2,4	78,5	1,32	2,5	76,7	1,21	3,3	81,1	1,32
22-26	218	3,1	85,0	1,30	3,5	85,4	1,28	4,3	86,0	1,31
27-31	270	3,8	83,9	1,46	4,7	89,1	1,42	5,5	84,7	1,39
32-36	318	4,6	75,0	1,50	6,2	87,7	1,46	6,8	77,2	1,45
37-41	362	-	-	1,25	-	-	1,33	-	-	1,45
42-46	403	-	-	1,35	-	-	1,33	-	-	1,38
Média	-	2,7	67,6	1,30	3,2	71,2	1,28	3,9	72,3	1,33

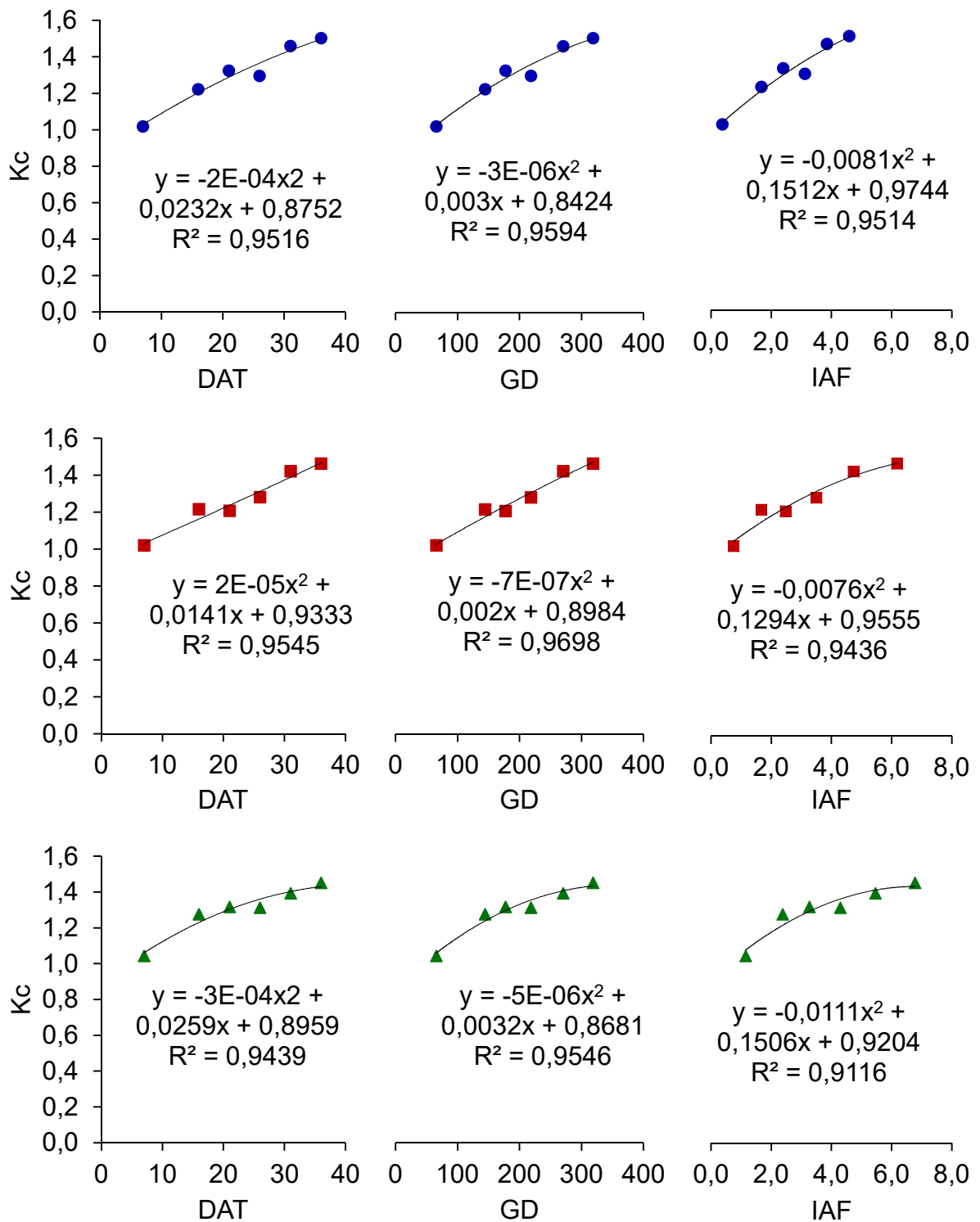
Valores diários de Kc para cada tratamento, obtidos pela média móvel entre 5 valores (valor de determinado DAT, 2 valores antecessores e 2 valores sucessores) são demonstrados na Figura 15. As curvas diárias de Kc tiveram elevação de 1,00 a 1,46 na CTC9005HP, 1,02 a 1,53 na RB966928 e 1,02 a 1,49 na SP87365.



**Figura 15.** Coeficiente de cultura (Kc) dos tratamentos (CTC9005HP, RB966928 e SP87365) durante o período experimental. DAT – dias após a transferência.

A evidência de aumento de Kc dos tratamentos ao longo do ciclo destaca a importância de realizar o manejo correto de irrigações da cultura de acordo com a necessidade hídrica em cada etapa de desenvolvimento. A demanda hídrica do cultivo também está relacionada às condições meteorológicas atuantes em cada período. Deste modo, podemos afirmar que a fixação de lâminas de irrigação ao longo do ciclo de produção de MPB determina, em geral, a condição de excesso de água no início do ciclo, ocasionando desperdício de água e energia e maior propensão no aparecimento de doenças à cultura, e déficit hídrico no final do ciclo, causando impactos negativos no desenvolvimento das plantas. A poda foi notadamente a causa de decréscimo do Kc após os 37 DAT.

Os modelos de Kc apresentaram elevada correlação com DAT ( $R^2 > 0,94$ ), GD ( $R^2 > 0,95$ ) e IAF ( $R^2 > 0,91$ ) para os três tratamentos (Figura 16), proporcionando ferramenta confiável para manejo de irrigação de MPB sob cultivo protegido.



**Figura 16.** Coeficiente de cultura ( $K_c$ ) dos tratamentos (CTC9005HP, RB966928 e SP87365) durante o período experimental. DAT – dias após a transferência.

### 4.3 Análise de crescimento

A análise de variância demonstrou diferenças para cultivar ao nível de 1% de significância nas avaliações de AC, DC, AF e UC e ao nível de 5% de significância nas avaliações de MFF, MSF e UF. Avaliações de UF, MFC, MSC, MFT e MST não diferiram estatisticamente entre cultivares. Quanto à época, todas as avaliações diferiram ao nível de 1% de significância. A interação entre cultivar e época gerou diferenças ao nível de 1% de significância apenas na avaliação de UC. (Tabelas 6 a 9).

**Tabela 6.** Análise de variância para altura de colmos (AC), diâmetro de colmos (DC) e área foliar (AF) das cultivares e épocas após a transferência do estudo.

Fator de variação	GL	QM		
		AC (cm)	DC (mm)	AF (cm <sup>2</sup> )
Cultivar	2	64,16**	8,48**	21040,32**
Época	4	1469,73**	59,37**	108318,06**
Cultivar x Época	8	5,43ns	2,23ns	483,99ns
CV parcelas	-	16,68	15,21	27,06
CV subparcelas	-	16,26	15,11	26,60

\*\* - significativo ( $p < 0,01$ ), \* - significativo ( $p < 0,05$ ), ns: não significativo, CV - coeficiente de variação, GL - grau de liberdade, QM - quadrado médio.

**Tabela 7.** Análise de variância para massa fresca de folhas (MFF), massa seca de folhas (MSF) e umidade de folhas (UF) das cultivares e épocas após a transferência do estudo.

Fator de variação	GL	QM		
		MFF (g)	MSF (g)	UF (%)
Cultivar	2	6,18*	0,29*	6,98ns
Época	4	107,13**	4,88**	54,50**
Cultivar x Época	8	0,54ns	0,03ns	1,37ns
CV parcelas	-	34,58	36,76	1,79
CV subparcelas	-	32,85	35,73	1,49

\*\* - significativo ( $p < 0,01$ ), \* - significativo ( $p < 0,05$ ), ns: não significativo, CV - coeficiente de variação, GL - grau de liberdade, QM - quadrado médio.



**Tabela 8.** Análise de variância para massa fresca de colmos (MFC), massa seca de colmos (MSC) e umidade de colmos (UC) das cultivares e épocas após a transferência do estudo.

Fator de variação	GL	QM		
		MFC (g)	MSC (g)	UC (%)
Cultivar	2	5,17ns	< 0,01ns	15,39**
Época	4	411,99**	7,34**	42,29**
Cultivar x Época	8	1,95ns	0,02ns	2,47**
CV parcelas	-	47,69	46,81	1,12
CV subparcelas	-	43,82	43,41	0,95

\*\* - significativo ( $p < 0,01$ ), \* - significativo ( $p < 0,05$ ), ns: não significativo, CV - coeficiente de variação, GL - grau de liberdade, QM - quadrado médio.

**Tabela 9.** Análise de variância para massa fresca total (MFT), massa seca total (MST) e umidade total (UT) das cultivares e épocas após a transferência do estudo.

Fator de variação	GL	QM		
		MFT (g)	MST (g)	UT (%)
Cultivar	2	16,08ns	0,32ns	4,50*
Época	4	907,69**	23,48**	55,86**
Cultivar x Época	8	3,96ns	0,10ns	0,94ns
CV parcelas	-	41,50	40,67	1,36
CV subparcelas	-	38,16	38,16	1,02

\*\* - significativo ( $p < 0,01$ ), \* - significativo ( $p < 0,05$ ), ns: não significativo, CV - coeficiente de variação, GL - grau de liberdade, QM - quadrado médio.

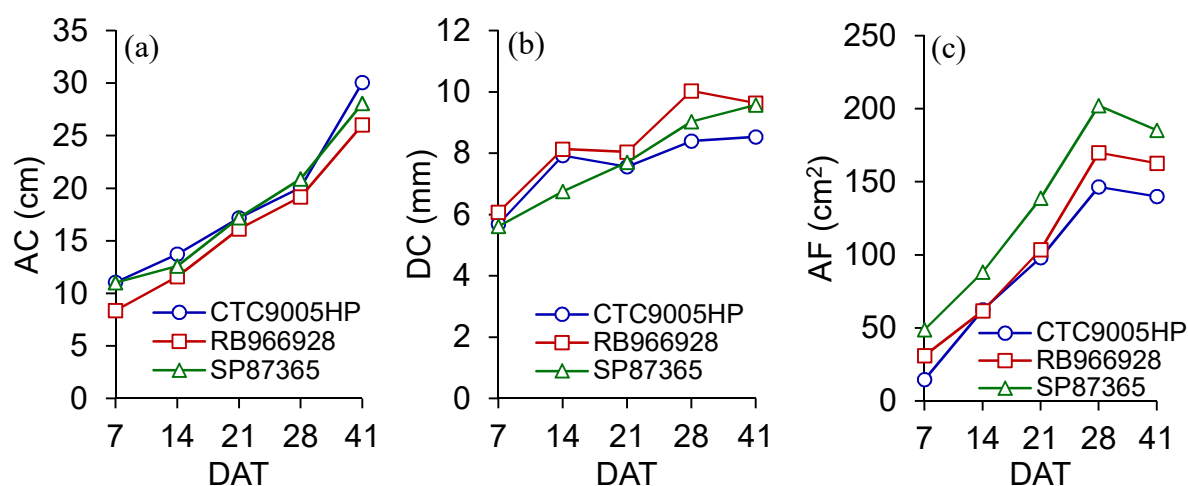
A AC foi maior nas cultivares CTC9005HP e SP87365, diferenças verificadas somente no início do ciclo (7 a 14 DAT). Houve aumento da AC em todas as épocas de avaliação, evidenciando que a poda de folhas aos 37 DAT não interferiu negativamente nesta avaliação de crescimento (Tabela 10 e Figura 17a).

Por outro lado, o DC foi superior na cultivar RB966928, sendo verificadas diferenças aos 14 e 28 DAT. O aumento de DC ocorreu dos 7 aos 14 DAT e dos 21 aos 28 DAT. O fato de não ter havido acréscimo no DC dos 14 aos 21 DAT pode ter sido resultado da diminuição da temperatura mínima aos 18 DAT (Figura 4), enquanto que a estagnação do crescimento de DC dos 28 aos 41 DAT indica possível impacto da poda de folhas (Tabela 10 e Figura 17b).

A AF foi superior na cultivar SP87365, sendo verificadas diferenças ao longo de todo o ciclo. O aumento de AF ocorreu até os 28 DAT, momento a partir do qual não houve mais crescimento, indicando impacto da poda de folhas aos 37 DAT (Tabela 10 e Figura 17c).

**Tabela 10.** Altura de colmos (AC), diâmetro de colmos (DC) e área foliar (AF) dos tratamentos durante o período de estudo. DAT – dias após a transferência.

Variável	Tratamento	DAT					Média
		7	14	21	28	41	
AC (cm)	CTC9005HP	11,06 a	13,74 a	17,19 a	20,09 a	30,05 a	18,43 a
	RB966928	8,39 b	11,61 b	16,14 a	19,20 a	26,06 a	16,28 b
	SP87365	11,04 a	12,63 ab	17,23 a	20,91 a	28,10 a	17,98 a
	Média	10,16 e	12,66 d	16,85 c	20,07 b	28,07 a	-
DC (mm)	CTC9005HP	5,69 a	7,93 a	7,57 a	8,40 b	8,53 a	7,62 b
	RB966928	6,09 a	8,13 a	8,04 a	10,04 a	9,64 a	8,39 a
	SP87365	5,62 a	6,76 b	7,71 a	9,03 ab	9,58 a	7,74 b
	Média	5,80 c	7,61 b	7,77 b	9,16 a	9,25 a	-
AF (cm <sup>2</sup> )	CTC9005HP	14,63 c	62,47 b	98,14 b	146,68 b	140,03 b	92,39 b
	RB966928	31,12 b	61,80 b	103,63 ab	169,93 ab	162,76 ab	105,85 b
	SP87365	48,84 a	88,19 a	138,89 a	202,17 a	185,33 a	132,68 a
	Média	31,53 d	70,82 c	113,55 b	172,93 a	162,71 a	-

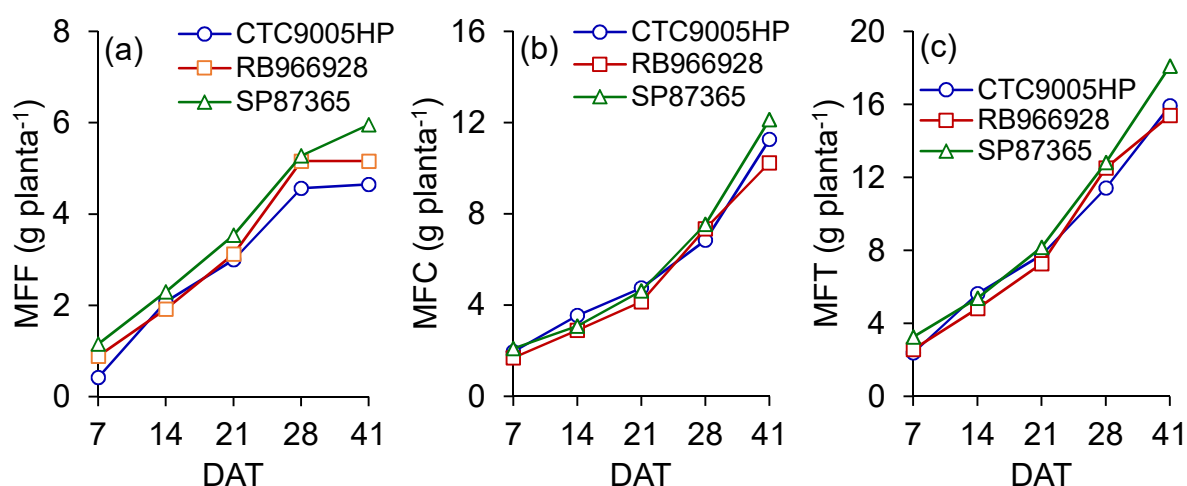


**Figura 17.** Altura de colmos (AC) (a), diâmetro de colmos (DC) (b) e área foliar (AF) (c) dos tratamentos durante o período de estudo. DAT – dias após a transferência.

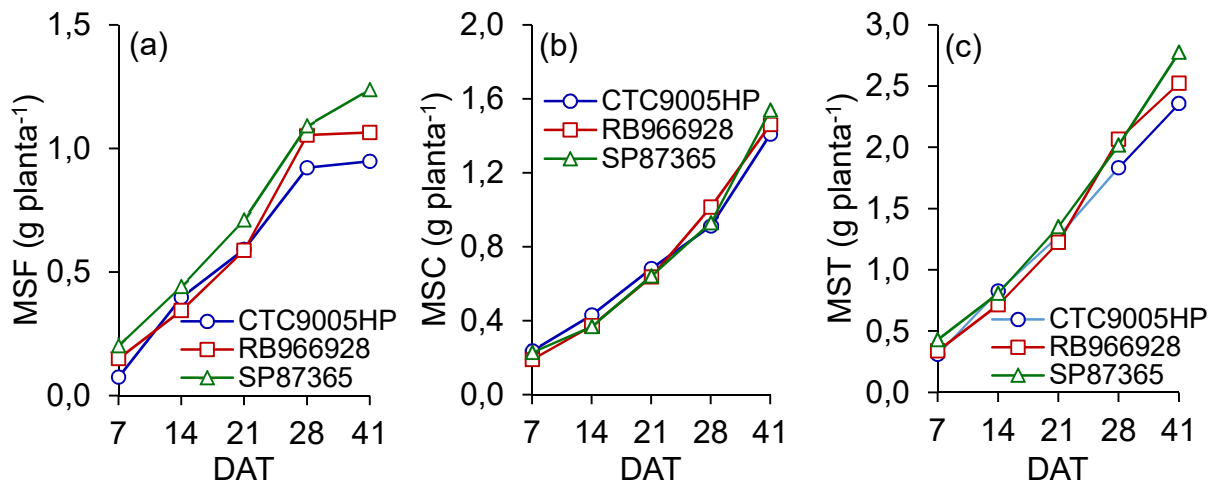
A MFF e MSF da SP87365 foi superior à CTC9005HP, mas RB966928 não diferiu das demais. Estas diferenças ocorreram aos 7 DAT e aos 41 DAT. O aumento de MFF e MSF ocorreu até os 28 DAT, momento a partir do qual não houve mais crescimento, indicando impacto da poda de folhas aos 37 DAT. (Tabela 11 e Figura 18a e 19a). A UF decresceu ao longo do ciclo das plantas, mas não foram verificadas diferenças entre cultivares (Tabela 11 e Figura 20a).

**Tabela 11.** Massa fresca de folhas (MFF), Massa seca de folhas (MSF) e umidade de folhas (UF) dos tratamentos durante o período de estudo. DAT – dias após a transferência.

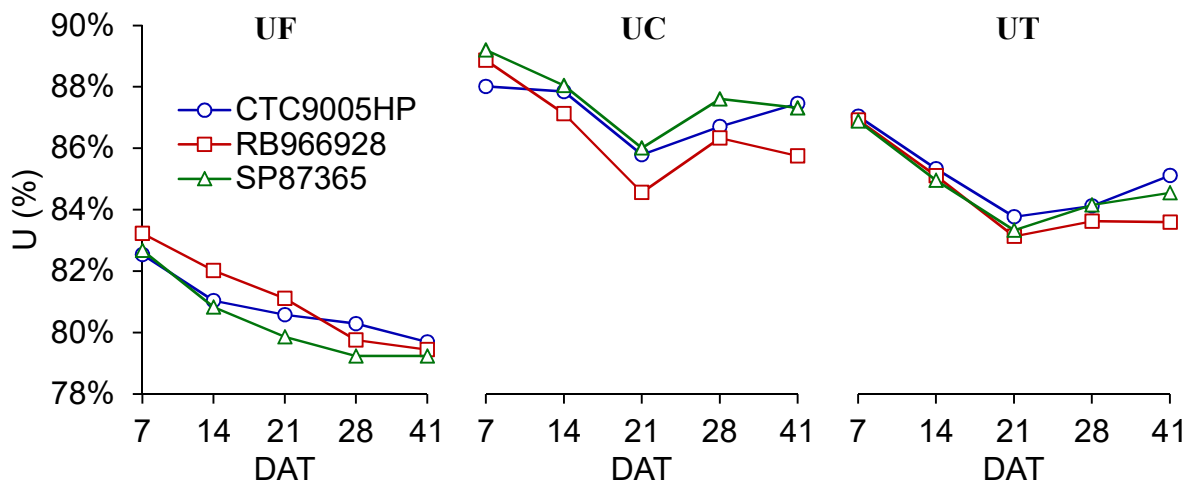
Variável	Tratamento	DAT					Média
		7	14	21	28	41	
MFF (g)	CTC9005HP	0,42 b	2,08 a	3,00 a	4,57 a	4,65 b	2,95 b
	RB966928	0,89 a	1,92 a	3,13 a	5,16 a	5,16 ab	3,25 ab
	SP87365	1,16 a	2,30 a	3,54 a	5,28 a	5,96 a	3,65 a
	Média	0,83 d	2,10 c	3,22 b	5,00 a	5,26 a	-
MSF (g)	CTC9005HP	0,07 b	0,40 a	0,59 a	0,92 a	0,95 b	0,59 b
	RB966928	0,15 a	0,34 a	0,59 a	1,05 a	1,06 ab	0,64 ab
	SP87365	0,20 a	0,44 a	0,71 a	1,09 a	1,24 a	0,74 a
	Média	0,14 d	0,39 c	0,63 b	1,02 a	1,08 a	-
UF (%)	CTC9005HP	82,54 a	81,04 ab	80,58 a	80,28 a	79,69 a	80,83 a
	RB966928	83,23 a	82,02 a	81,11 a	79,76 a	79,44 a	81,11 a
	SP87365	82,68 a	80,83 b	79,86 a	79,24 a	79,24 a	80,37 a
	Média	82,81 a	81,30 b	80,52 bc	79,76 cd	79,46 d	-



**Figura 18.** Massa fresca de folhas (MFF) (a), massa fresca de colmos (MFC) (b) e massa fresca total (MFT) (c) dos tratamentos durante o período de estudo. DAT – dias após a transferência.



**Figura 19.** Massa seca de folhas (MSF) (a), massa seca de colmos (MSC) (b) e massa seca total (MST) (c) dos tratamentos durante o período de estudo. DAT – dias após a transferência.



**Figura 20.** Umidade de folhas (UF), umidade de colmos (UC) e umidade total (UT) dos tratamentos durante o período de estudo. DAT – dias após a transferência.

Não houve diferenças significativas entre cultivares nas avaliações de MFC e MSC, sendo verificado crescimento destas avaliações a partir dos 14 DAT (Tabela 12 e Figuras 18b e 19b). A UC foi inferior na cultivar RB966928, não sendo possível encontrar padrão de crescimento desta avaliação (Tabela 12 e Figura 20b).

**Tabela 12.** Massa fresca de colmos (MFC), Massa seca de colmos (MSC) e umidade de colmos (UC) dos tratamentos durante o período de estudo. DAT – dias após a transferência.

Variável	Tratamento	DAT					Média
		7	14	21	28	41	
MFC (g)	CTC9005HP	1,96 a	3,54 a	4,75 a	6,85 a	11,27 a	5,67 a
	RB966928	1,69 a	2,90 a	4,15 a	7,36 a	10,24 a	5,27 a
	SP87365	2,10 a	3,09 a	4,63 a	7,55 a	12,14 a	5,90 a
	Média	1,92 d	3,18 cd	4,51 c	7,25 b	11,22 a	-
MSC (g)	CTC9005HP	0,24 a	0,43 a	0,68 a	0,91 a	1,41 a	0,73 a
	RB966928	0,19 a	0,37 a	0,64 a	1,01 a	1,46 a	0,73 a
	SP87365	0,23 a	0,37 a	0,64 a	0,93 a	1,54 a	0,74 a
	Média	0,22 d	0,39 d	0,65 c	0,95 b	1,47 a	-
UC (%)	CTC9005HP	87,98 b	87,80 ab	85,76 a	86,68 ab	87,42 a	87,13 a
	RB966928	88,82 ab	87,09 b	84,54 b	86,30 b	85,72 b	86,50 b
	SP87365	89,16 a	88,01 a	85,98 a	87,57 a	87,28 a	87,60 a
	Média	88,65 a	87,63 b	85,43 d	86,85 c	86,81 c	-

Também não houve diferenças significativas entre cultivares nas avaliações de MFT e MST, sendo verificado crescimento destas avaliações desde o início do ciclo (Tabela 13 e Figuras 18c e 19c). A UT foi inferior na cultivar RB966928, com decréscimo dos valores desta avaliação para as cultivares até os 21 DAT e acréscimo aos 41 DAT (Tabela 13 e Figura 20c).

**Tabela 13.** Massa fresca total (MFT), Massa seca total (MST) e umidade total (UT) dos tratamentos durante o período de estudo. DAT – dias após a transferência.

Variável	Tratamento	DAT					Média
		7	14	21	28	41	
MFT (g)	CTC9005HP	2,38 a	5,63 a	7,75 a	11,41 a	15,92 a	8,62 a
	RB966928	2,58 a	4,82 a	7,28 a	12,52 a	15,40 a	8,52 a
	SP87365	3,26 a	5,38 a	8,17 a	12,82 a	18,10 a	9,55 a
	Média	2,74 d	5,28 cd	7,73 c	12,25 b	16,47 a	-
MST (g)	CTC9005HP	0,31 a	0,83 a	1,27 a	1,83 a	2,36 a	1,32 a
	RB966928	0,34 a	0,72 a	1,22 a	2,07 a	2,52 a	1,37 a
	SP87365	0,43 a	0,81 a	1,35 a	2,02 a	2,78 a	1,48 a
	Média	0,36 e	0,78 d	1,28 c	1,97 b	2,55 a	-
UT (%)	CTC9005HP	87,01 a	85,30 a	83,75 a	84,10 a	85,08 a	85,05 a
	RB966928	86,88 a	85,08 a	83,12 a	83,60 a	83,57 b	84,45 b
	SP87365	86,86 a	84,94 a	83,31 a	84,14 a	84,53 ab	84,75 ab
	Média	86,92 a	85,11 b	83,39 d	83,94 cd	84,39 bc	-

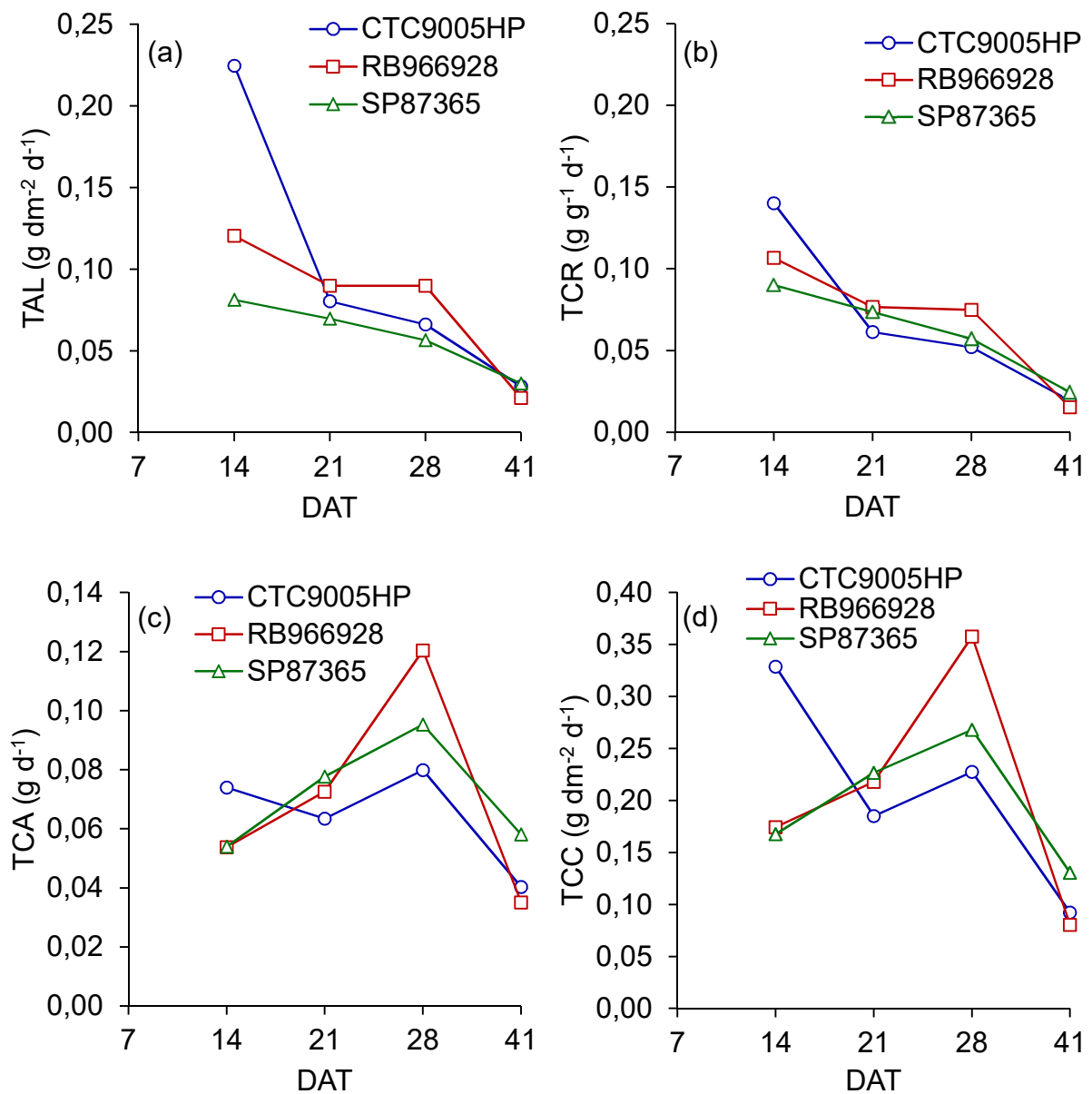
A TAL é o índice de assimilação de matéria vegetal relativa à AF da planta. Portanto, o decréscimo de TAL ao longo do ciclo dos tratamentos evidenciou que o aumento de AF não ocasionou assimilação proporcional de matéria vegetal. Maiores áreas foliares entre tratamentos não geraram acúmulo de matéria vegetal na mesma proporção, principalmente para o tratamento SP87365 que obteve as menores TAL associadas às maiores áreas foliares ao longo do ciclo (Figura 21a).

A TCR, que considera a matéria seca vegetal pré-existente, apresentou valores decrescentes em todos os tratamentos, evidenciando que independente de cultivar de cana-de-açúcar, MPBs apresentam incremento mais intenso no início do que no final do ciclo (Figura 21b).

A TCA, definida pelo aumento absoluto de matéria seca vegetal, com exceção da CTC9005HP, foi crescente ao longo do ciclo antes da poda de folhas (Figura 21c).

A TCC, representada pela velocidade de crescimento, também foi crescente ao longo do ciclo antes da poda, com exceção da CTC9005HP (Figura 21d).

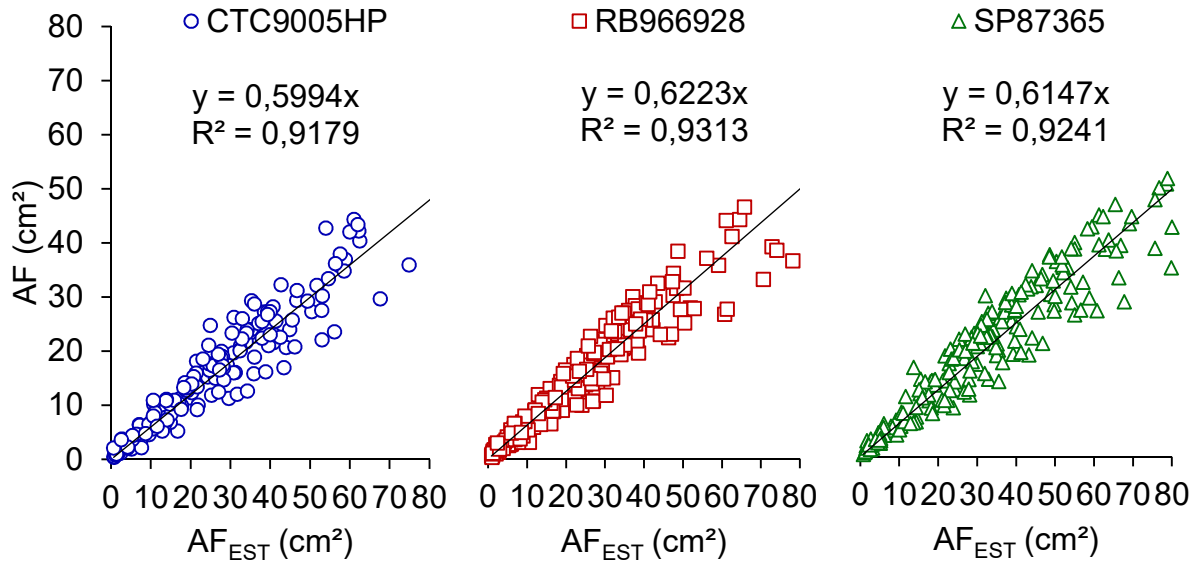
O crescimento dos tratamentos foi reduzido pela poda aos 37 DAT, fato comprovado pelo decréscimo nas taxas apresentadas na Figura 21.



**Figura 21.** Taxa de assimilação líquida (TAL) (a), taxa de crescimento relativo (TCR) (b), taxa de crescimento absoluto (TCA) (c) e taxa de crescimento da cultura (TCC) (d) dos tratamentos durante o período de estudo. DAT – dias após a transferência.

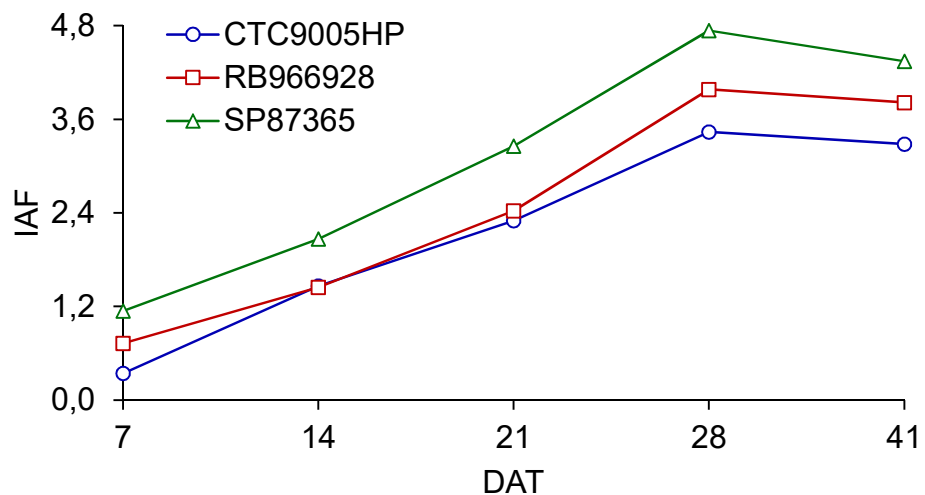
O modelo de estimativa de área foliar ( $AF_{EST}$ ), apresentou boa correlação ( $R^2 > 0,91$ ) entre o produto do comprimento pela largura de folhas ( $C \times L$ ) e a área foliar medida em software ImageJ®, proporcionando alternativa viável para determinar área foliar das cultivares de MPB estudadas (Figura 22). O coeficiente angular da regressão entre  $AF$  e  $AF_{EST}$  representa o fator forma de folhas (FF), que representa

matematicamente o formato médio das folhas de cada cultivar. O FF para CTC9005HP foi 0,5994, para RB966928 foi 0,6223 e para SP87365 foi 0,6147.



**Figura 22.** Área foliar (AF) medida no Software ImageJ® e área foliar estimada (AF<sub>EST</sub>) pelo método de comprimento multiplicado à largura de folhas.

O IAF de SP87365 foi superior aos demais desde o início do ciclo, enquanto que o IAF de RB966928 superou CTC9005HP a partir de 28 DAT (Figura 23).



**Figura 23.** Índice de área foliar (IAF) dos tratamentos durante o período de estudo. DAT – dias após a transferência.

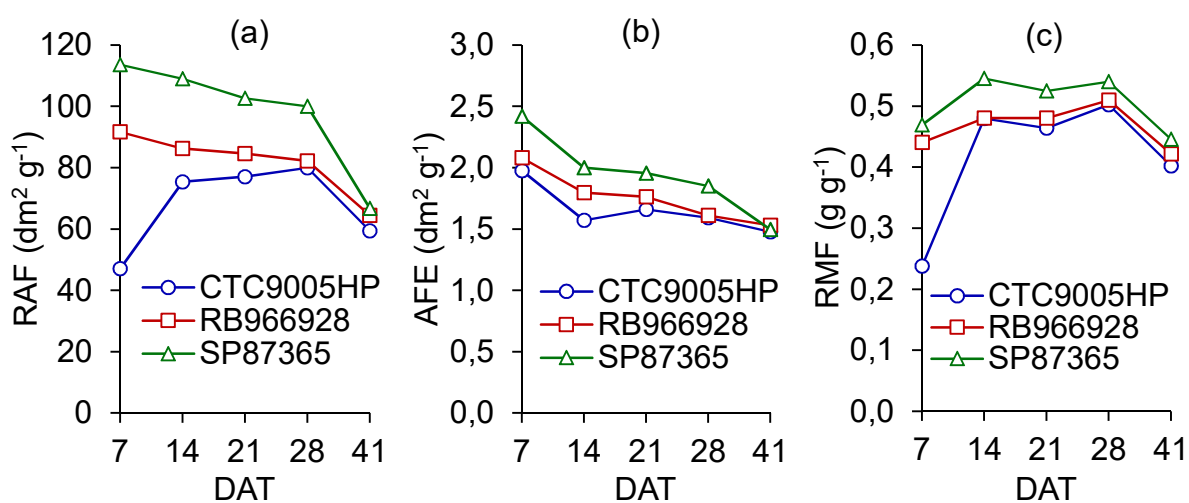


A poda das folhas aos 37 DAT ocasionou impacto na AF dos tratamentos, portanto, os índices de crescimento associados a este fator tiveram decréscimo após este processo.

A RAF, definida pela relação entre AF e MST, obteve decréscimo semelhante ao longo do ciclo, antes da poda, nos tratamentos SP87365 e RB966928. Entretanto, SP87365 obteve valores superiores de RAF, pois os valores de AF neste tratamento foram superiores. Por outro lado, antes da poda, CTC9005HP obteve crescimento da RAF (Figura 24a).

O decréscimo de AFE nos tratamentos demonstrou redução na espessura das folhas, causada pelo aumento mais acentuado de AF do que de MSF (Figura 24b).

No início do ciclo (7 a 14 DAT), o acréscimo na RMF provavelmente deve ter sido ocasionado pela abertura de novas folhas neste período. Após os 14 DAT a RMF se manteve praticamente constante, evidenciando que, à partir desta data, o incremento de massa de folhas foi proporcional ao crescimento da planta (Figura 24c).



**Figura 24.** Razão de área foliar (RAF) (a), área foliar específica (AFE) (b) e razão de massa de folhas (RMF) (c) dos tratamentos durante o período de estudo. DAT – dias após a transferência.

#### 4.4 Eficiência do uso da água

Na EUA de massas frescas, em MFF o tratamento SP87365 foi superior, obtendo 6,98 kg m<sup>-3</sup>, seguido de RB966928 com 6,15 kg m<sup>-3</sup> e CTC9005HP com 5,47 kg m<sup>-3</sup>. Em MFC, a maior EUA foi de SP87365 com 14,24 kg m<sup>-3</sup>, CTC9005HP com 13,27 kg m<sup>-3</sup> e RB966928 com 12,21 kg m<sup>-3</sup>. Quanto à MFT, SP87365 foi superior com

21,22 kg m<sup>-3</sup>, seguida por CTC9005HP com 18,74 kg m<sup>-3</sup> e RB966928 com 18,36 kg m<sup>-3</sup> (Tabela 14).

**Tabela 14.** Eficiência final de uso de água (EUA) de massa fresca de folhas (MFF), massa fresca de colmos (MFC) e massa fresca total (MFT) dos tratamentos.

Tratamento	EUA (kg m <sup>-3</sup> )		
	MFF	MFC	MFT
CTC9005HP	5,47	13,27	18,74
RB966928	6,15	12,21	18,36
SP87365	6,98	14,24	21,22
Média	6,20	13,24	19,44

Na EUA de massas secas, em MSF o tratamento SP87365 foi superior, obtendo 1,45 kg m<sup>-3</sup>, seguido de RB966928 com 1,27 kg m<sup>-3</sup> e CTC9005HP com 1,12 kg m<sup>-3</sup>. Em MSC, a maior EUA foi de SP87365 com 1,80 kg m<sup>-3</sup>, RB966928 com 1,74 kg m<sup>-3</sup> e CTC9005HP com 1,66 kg m<sup>-3</sup>. Quanto à MST, SP87365 foi superior com 3,25 kg m<sup>-3</sup>, seguida por RB966928 com 3,01 kg m<sup>-3</sup> e CTC9005HP com 2,77 kg m<sup>-3</sup> (Tabela 15).

**Tabela 15.** Eficiência final de uso de água (EUA) de massa seca de folhas (MSF), massa seca de colmos (MSC) e massa seca total (MST) dos tratamentos.

Tratamento	EUA (kg m <sup>-3</sup> )		
	MSF	MSC	MST
CTC9005HP	1,12	1,66	2,77
RB966928	1,27	1,74	3,01
SP87365	1,45	1,80	3,25
Média	1,28	1,73	3,01

## 5 CONCLUSÕES

- Os lisímetros construídos e calibrados apresentaram precisão e acurácia na detecção de variações de ME em torno de 0,1 mm e magnitude de histerese que não comprometeu as avaliações de evapotranspiração;
- O custo de confecção dos lisímetros (R\$ 1685,80) foi baixo, com exceção do sistema de aquisição de dados;
- ETc dos tratamentos variou de 3,0 a 6,9 mm d<sup>-1</sup> na CTC9005HP, 3,1 a 6,8 mm d<sup>-1</sup> na RB966928 e 2,9 a 6,6 mm d<sup>-1</sup> na SP87365;
- Kc teve elevação de 1,00 a 1,46 na CTC9005HP, 1,02 a 1,53 na RB966928 e 1,02 a 1,49 na SP87365. Os modelos de Kc dos tratamentos apresentaram boa correlação quadrática com DAT ( $R^2 > 0,94$ ), GD ( $R^2 > 0,95$ ) e IAF ( $R^2 > 0,91$ );
- A poda das folhas aos 37 DAT causou decréscimo em ETc e, conseqüentemente, no Kc dos tratamentos;
- AC foi superior em SP87365 e CTC9005HP e DC foi superior em RB966928. SP87365 foi superior à CTC9005HP nas avaliações foliares. Massas frescas e secas de colmos e total não diferiram entre cultivares. Épocas de avaliação apresentaram diferenças nas avaliações, confirmando o crescimento das plantas;
- EUA de massa seca foi superior em SP87365, seguido de RB966928 e CTC9005HP;
- Os equipamentos apresentaram baixo custo e suas medidas foram apropriadas para estudo da ETc e Kc para manejo de irrigação de MPB em cultivo protegido.

## 6 REFERÊNCIAS

- ABEDINPOUR, M. Evaluation of growth-stage-specific crop coefficients of maize using weighing lysimeter. **Soil & Water Research**, v. 10, p. 99-104, 2015.
- ALLEN, R.G.; FISCHER, D.K. Direct load cell-based weighing lysimeter system. In: ALLEN, R. G.; HOWELL, T.A.; PRUITT, W.O.; WATER, I.A.; JENSEN, E. (Eds.) Lysimeter for evapotranspiration and environmental measurements. New York: **American Society of Civil Engineers**, 1991. p. 114-124.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. **United Nations Food and Agriculture Organization (FAO) - Irrigation and drainage paper 56**, Rome, 1998.
- ALVARENGA, A.A.; NERY, F.C.; RODRIGUES, A.C. **Experimentação em Fisiologia Vegetal**. UFLA (Universidade Federal de Lavras), 2015. 171 p.
- ALVARES, C.A.; STAPE, J.L; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- ANAPALLI, S.S.; AHUJA, L.R.; GOWDA, P.H.; LIWANG, M.; MAREK, G.; EVETT, S.R.; HOWELL, T.A.; Simulation of crop evapotranspiration and crop coefficients with datain weighing lysimeters. **Agricultural Water Management**, v. 177, p. 274-283, 2016.
- AYYOUB, A.; ER-RAKI, S.; KHABBA, S.; MERLIN, O.; EZZAHAR, J.; RODRIGUEZ, J.C.; BAHLAOUI, A.; CHEHBOUNI, A. A simple and alternative approach based on reference evapotranspiration and leaf area index for estimating tree transpiration in semi-arid regions. **Agricultural Water Management**, v. 188, p. 61-68, 2017.
- BARBIERI, V.; BACCHI, O.O.S.; VILLA NOVA, N.A. Análise do fator temperatura do ar no desenvolvimento vegetativo da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 1., 1979, Mossoró. **Anais...** Mossoró: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1979. p. 6-8.
- BARBIERI, V. Medidas e estimativas de consumo hídrico em cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*). Piracicaba, 1981, 82p. **Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo**.
- BARBOSA, J.C.; MALDONADO JÚNIOR, W. **Experimentação Agronômica & Agroestat**: Sistemas para análises estatísticas de ensaios agronômicos. Funep, Jaboticabal, 2015.
- CAIRO, P.A.R.; OLIVEIRA, L.E.M.; MESQUITA, A.C. **Análise de crescimento de plantas**. Vitória da Conquista: Edições UESB, 2008. 72 p.
- CAMPECHE, L.F.S.M. Construção, calibração e análise de funcionamento de lisímetros de pesagem para determinação da evapotranspiração da cultura da lima ácida "Tahiti" (*Citrus latifolia* Tan.). Piracicaba, 2002. 67p. **Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo**.

CARVAJAL, C.J.; PEÑALVER, L.R.; REPULLO, J.A.V.; BUENDÍA, M.J.; MERINO, A.A.; MARTÍNEZ, J.M.M. Weighing lysimetric system for the determination of the water balance during irrigation in potted plants. **Agricultural Water Management**, v. 183, p. 78-85, 2017.

CEPAGRI. **Clima dos municípios paulistas**. Disponível em: [http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima\\_muni\\_461.html](http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_461.html). Acesso em: 13/06/2017.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. Acompanhamento da safra brasileira: primeiro levantamento da safra 2017/2018, abril, 2017. Disponível em: <[http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17\\_04\\_20\\_14\\_04\\_31\\_boletim\\_cana\\_portugues\\_-\\_1o\\_lev\\_-\\_17-18.pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17_04_20_14_04_31_boletim_cana_portugues_-_1o_lev_-_17-18.pdf)>. Acesso em: 17 jun. 2017.

CONTRERAS, J.I.; ALONSO, F.; CÁNOVAS, G.; BAEZA, R. Irrigation management of greenhouse zucchini with diferente soil matric potential level. Agronomic and environmental effects. **Agricultural Water Management**, v. 183, p. 26-34, 2017.

DILLEWIJN, C.V. Botany of sugarcane. **Waltham: Chronica Botânica**, 1952. 371 p.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. Crop yield response to water. **United Nations Food and Agriculture Organization (FAO) - Irrigation and drainage paper 33**, Rome, 1979.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. Crop Water Requirements. **United Nations Food and Agriculture Organization (FAO) - Irrigation and drainage paper 24**, Rome, 1977.

DU, T.; KANG, S.; ZHANG, X.; ZHANG, J. Chinas's food security is threatened by the unsustainable use of water resources in North and Northwest China. **Food and Energy Security**, v. 3, iss. 1, p. 7-8, 2014.

FAUCONNIER, R.; BASSEREAU, D. **La caña de azúcar**. Barcelona: Blume, 1975. 433 p.

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

FATHALIAN, F.; EMAMZADEI, R.N.; Determination of evapotranspiration and crop coefficient of cucumber by using microlysimeter in greenhouse conditions. **Journal of Science and Technology of Greenhouse Culture**, v. 3, n. 12, p. 125-134, 2013.

FIGUEIREDO, P. Breve história da cana-de-açúcar e do papel do instituto agrônomo no seu estabelecimento no Brasil. In: DINARDO-MIRANDA, L.L.; VASCONCELOS, A.C.M.; LANDELL, M.G.A. **Cana-de-açúcar**. Instituto Agrônomo de Campinas, Campinas, 2010. 882 p.

FILOSOFO, S.; CARMO, J.B.; MARDEGAN, S.F.; LINS, S.R.M.; GOMES, T.F.; MARTINELLI, L.A. Reassessing the environmental impacts of sugarcane ethanol production in Brazil to help meet sustainability goals. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 52, p. 1847-1856, 2015.

FRANCISCO, P.R.M.; SANTOS, D.; LIMA, E.R.V. Potencial pedoclimático do estado da paraíba para a cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*). **Geo UERJ**, n. 30, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.12957/geouerj>.

GIRARDI, L.B.; PEITER, M.X.; BELLÉ, R.A.; ROBAINA, A.D.; TORRES, R.R.; KIRCHNER, J.H.; BEN, L.H.B. Evapotranspiração e coeficiente de cultura da alstroemeria (*Alstroemeria x hybrida*) cultivada em estufa. **Irriga**, v. 21, n. 4, p. 817-829, 2016.

Global Bioeconomy Summit. Bioeconomy Work for Sustainable Development. Berlin, 2015.

HAGENAU, J.; MEISSNER, R.; BORG, H. Effect of exposure on the water balance of two identical lysimeters. **Journal of Hydrology**, v. 520, p. 69-74, 2015.

HOWELL, T.A.; SCHNEIDER, A.D.; DUSEK, D.A.; MAREK, T.H.; STEINER, J.L. Calibration and scale performance of Bushland weighing lysimeters. **Transactions of the ASAE**, v.38, n.4, p.1019-1024, 1995.

JI, X.B.; CHEN, J.M.; ZHAO, W.Z.; KANG, E.S.; JIN, B.W.; XU, S.Q. Comparison of hourly and daily Penman-Monteith grass-and-alfafa-reference evapotranspiration equations and crop coefficients for maize under arid climatic conditions. **Agricultural Water Management**, v. 192, p. 1-11, 2017.

KIM, H.J.; LEE, D.H.; AHN, S.W.; KIM, W.K.; HUR, S.O.; CHOI, J.Y.; CHUNG, S.O. Design and testing of an autonomous irrigation controller for precision water management of greenhouse crops. **Engineering in Agriculture, Environment and Food**, v. 8, iss. 4, p. 1-7, 2015

LANDELL, M.G.A.; CAMPANA, M.P.; PERY, F.; XAVIER, M.A.; ANJOS, I.A.; DINARDO-MIRANDA; L.L.; SCARPARI, M.S.; GARCIA, J.C.; BIDÓIA, M.A.P.; SILVA, D.N.; MENDONÇA, J.R.; KANTHACK, R.A.D.; CAMPOS, M.F.; BRANCALIÃO, S.R.; PETRI, R.H.; MIGUEL, P.E.M.; Sistema de multiplicação de cana-de-açúcar com uso de mudas pré-brotadas (MPB), oriundas de gemas individualizadas. **Ribeirão Preto: Instituto Agrônomo de Campinas**, 2012.

LIMA, J.R.S.; ANTONINO, A.C.D.; LIRA, C.A.B.O.; SOUZA, E.S.; SILVA, I.D.F. Balanço de energia e evapotranspiração de feijão-caupi sob condições de sequeiro. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 42, n. 1, p. 65-74, 2011.

LIMA, N.S.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; ALBUQUERQUE FILHO, J.A.C.; SILVA, E.F.F.; MONTENEGRO, A.A.A.; NASCIMENTO, A.H.C. Desempenho de um lisímetro de pesagem hidráulica com transdutor de pressão hidrostática e sistema manométrico. **Irriga**, v. 18, n. 3, p. 540-557, 2013.

LIU, X.; XU, C.; ZHONG, X.; YUAN, X.; CAO, J. Comparison os 16 models for reference evapotranspiration agains weighing lysimeter measurement. **Agricultural Water Management**, v. 184, p. 145-155, 2017.

LOOSE, L.H.; MALDANER, I.C.; HELDWEIN, A.B.; LUCAS, D.D.P.; RIGHI, E.Z. Evapotranspiração máxima e coeficiente de cultura da berinjela cultivada em estufa plástica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 3, p. 250-257, 2014.

MARIANO, D.C.; FARIA, R.T.; FREITAS, P.S.L.; LENA, B.P.; JOHANN, A.L. Construction and calibration of a bar weighing lysimeter. **Acta Scientiarum**, v. 37, n. 3, p. 271-278, 2015.

MARIN, F.R.; ANGELOCCI, L.R.; NASSIF, D.S.P.; COSTA, L.G.; VIANNA, M.S.; CARVALHO, K.S. Crop coefficient changes with reference evapotranspiration for highly canopy-atmosphere coupled crops. **Agricultural Water Management**, v. 163, p. 139-145, 2016.

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

MARTINS, I.P. Crescimento e consumo de água por manjeriço (*Ocimum basilicum* L.) sob diferentes regimes hídricos. Jaboticabal, 2016. 45p. **Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias**, Universidade Estadual Paulista.

NASCIMENTO, A.H.C.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; FILHO, J.A.C.A.; SILVA, E.F.F.; LIMA, N.S. Desempenho de um lisímetro de pesagem hidráulica com diferentes sistemas de leitura. **Irriga**, v. 1, n. 1, p. 232-245, 2016.

NASCIMENTO, E.F.; CAMPECHE, L.F.S.M.; BASSOI, L.H.; SILVA, J.A.; LIMA, A.C.M.; PEREIRA, F.A.C. Construção e calibração de lisímetros de pesagem para determinação da evapotranspiração e coeficiente de cultivo em videira de vinho cv. Syrah. **Irriga**, v. 16, n. 3, p. 271-287, 2011.

NOLZ, R.; KAMMERER, G.; CEPUDER, P. Interpretation of lysimeter weighing data affected by wind. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 176, p. 200-208, 2013.

OLIVEIRA, E.C.; CARVALHO, J.A.; ALMEIDA, E.F.A.; REZENDE, F.C.; SANTOS, B.G.D.; MIMURA, S.N. Evapotranspiração da roseira cultivada em ambiente protegido. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 3, p. 314-321, 2014.

OMETTO, J.C. Bioclimatologia vegetal. São Paulo: Agronômica Ceres, 1981. 440 p.

PANDORFI, H.; BEZERRA, A.C.; ATARASSI, R.T.; VIEIRA, F.M.C.; FILHO, J.A.D.B.; GUISELINI, C. Artificial neural networks employment in the prediction of evapotranspiration of greenhouse-grown sweet pepper. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, n. 6, p. 507-512, 2016.

PAMUNGKAS, A.P.; HATOU, K.; MORIMOTO, T. Modeling the evapotranspiration inside the greenhouse systems by using MATLAB Simulink. **IFAC Proceedings Volumes**, v. 46, iss. 4, p. 33-37, 2013.

PARDOSSI, A.; INCROCCI, L. Traditional and new approaches to irrigation scheduling in vegetable crops. **HortTechnology**, v. 21, n. 3, p. 309-313, 2011.

PATRIGNANI, A.; OCHSNER, T.E. Canopeo: A powerful new tool for measuring fractional green canopy cover. **Agronomy Journal**, v. 107, p. 2312-2320, 2015. Disponível em: <https://dl.sciencesocieties.org/publications/aj/abstracts/107/6/2312>. doi: 10.2134/agronj15.0150.

- PEÑALVER, L.R.; REPULLO, J. A.V.; BUENDÍA, M.J.; GUZMÁN, I.; MARTÍNEZ, J. M. M. Development of an innovative low cost weighing lysimeter for potted plants: Application in lysimetric stations. **Agricultural Water Management**, v. 151, p. 103-113, 2015.
- PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Meteorologia Agrícola**. Departamento de Ciências Exatas, ESALQ, Piracicaba, 2007.
- PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, G.C. **Evapotranspiração**. Piracicaba. Fealq, 2013.
- PERERA, K.C.; WESTERN, A.W.; NAWARATHNA, B.; GEOGE, B. Comparison of hourly and daily reference crop evapotranspiration equations across seasons and climate zones in Australia. **Agricultural Water Management**, v. 148, p. 84-96, 2015.
- PERES, J.G. Determinação dos coeficientes de cultura (Kc) da cana-de-açúcar: ciclo cana soca. Piracicaba, 1988, 94p. **Dissertação (Mestrado) - Escola superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo**.
- PERES, J.G.; MARCUSSI, L.; SOUZA, C.F.; LAVORENTI, N.A. Informações para o manejo da irrigação da couve de Bruxelas (*Brassica oleracea* var. *Gemmifera*) cultivada em ambiente protegido. **Irriga**, v. 20, n. 4, p. 615-629, 2015.
- PETERS, A.; GROH, J.; SCHRADER, F.; DURNER, W.; VEREECKEN, H.; PÜTZ, T. Towards an unbiased filter routine to determine precipitation and evapotranspiration from high precision lysimeter measurements. **Journal of Hydrology**, v. 549, p. 731-740, 2017.
- REPULLO J.A.V.; PEÑALVER, L.R.; BUENDÍA, M.J.; ROSILLO J.J.; MARTÍNEZ, J. M. M. Software for the automatic control of irrigation using weighing-drainage lysimeters. **Agricultural Water Management**, v. 151, p. 4-12, 2015.
- RODRÍGUEZ, F.; CASTILLA, M.; SÁNCHEZ, J.A.; PAWLOWSKI, A. Semi-virtual plant for modelling, control and supervision of batch-process. An example of a greenhouse irrigation system. **IFAC-PapersOnLine**, v. 48, iss. 29, p. 123-128, 2015.
- SAMPAIO, E.S. **Fisiologia Vegetal: Teorias e experimentos**. UEPG, 166 p., 2010.
- SCHEITERLE, L.; ULMER, A.; BIRNER, R.; PYKA, A. From commodity-based value chains to biomass-based value webs: The case of sugarcane in Brazil's bioeconomy. **Journal of Cleaner Production**, In Press, Accepted Manuscript, 2017. Disponível em <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.150>. Acesso em: 07/09/2017.
- SCHMIDT, C.D.S.; PEREIRA, F.A.C.; OLIVEIRA, A.S.; JÚNIOR, J.F.G.; VELLAME, L.M. Design, installation and calibration of a weighing lysimeter for crop evapotranspiration studies. **Water Resource and Irrigation Management**, v. 2, n. 2, p. 77-85, 2013.
- SCHRADER, F.; DURNER, W.; FANK, J.; GEBLER, S.; PÜTZ, T.; HANNES, M.; WOLLSCHLÄGER, U. Estimating precipitation and actual evapotranspiration from precision lysimeter measurements. **Procedia Environmental Sciences**, v. 19, p. 543-552, 2013.



SHARNA, H.; SHUKLA, M.K.; BOSLAND, P.W.; STEINER, R. Soil moisture sensor calibration, actual evapotranspiration, and crop coefficients for drip irrigated greenhouse chile peppers. **Agricultural Water Management**, v. 179, p. 81-91, 2017.

SILVA, J.M.; SILVA, T.J.A.; BONFIM-SILVA, E.M.; DUARTE, T.F.; PACHECO, A.B. Construction and assessment of a hydraulic weighing lysimeter. **African Journal of Agricultural Research**, v. 11, p. 951-960, 2016.

SILVA, S.; SANTOS, M.A.L.; TEODORO, I.; SOUSA, J.S.; NETO, J.D. Estimativa do coeficiente da cultura da cana-de-açúcar em função do índice de área foliar. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 8, n. 3, p. 212-220, 2013b.

SILVA, V.P.R.; SILVA, B.B.; ALBUQUERQUE, W.G.; BORGES, C.J.R.; SOUSA, I.F.; NETO, J.D. Crop coefficient, water requirements, yield and water use efficiency of sugarcane growth in Brazil. **Agricultural Water Management**, v. 128, p. 102-109, 2013a.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I.M.; MURPHY, A. **Plant Physiology and development**. 5th ed. Sinauer Associates, Incorporated, 2013, 954 p.

TOLEDO FILHO, M.R. Probabilidade de suprimento da demanda hídrica ideal da cultura de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) através da precipitação pluvial na zona canavieira do estado de Alagoas. Piracicaba, 1988, 72p. **Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo**.

VIANA, K.R.O.; PEREZ, R. Survey of sugarcane industry in Minas Gerais, Brazil: Focus on sustainability. **Biomass and Bioenergy**, v. 58, p. 149-157, 2013.

VILELA, M.S.; CABRAL FILHO, F.R.; TEIXEIRA, M.B.; AMARAL, A.M.; VELLAME, L.M.; SOARES, F.A.L. Acurácia de um mini-lisímetro de pesagem eletrônica de baixo custo. **Irriga**, v. 1, n. 2, p. 158-167, 2015.

WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C. M. Statistics for the Evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, v. 90, n. 5, p. 8995-9005, 1985.

ZHANG, Y.; PEÑA-ARANCIBIA, J.L.; MCVICAR, T.R.; CHIEW, F.H.S.; VAZE, J.; LIU, C.; LU, X.; ZHENG, H.; WANG, Y.; LIU, Y.Y.; MIRALLES, D.G.; PAN, M. **Multi-decadal trends in global terrestrial evapotranspiration and its components**, Scientific Reports, v. 6, p. 19124, 2016.