

**CONSTRUÇÃO, CALIBRAÇÃO E ANÁLISE DE
FUNCIONAMENTO DE LISÍMETROS DE PESAGEM PARA
DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CULTURA DA
LIMA ÁCIDA ‘TAHITI’ (*Citrus latifolia* Tan.)**

LUÍS FERNANDO DE SOUZA MAGNO CAMPECHE

Tese apresentada à Escola Superior
de Agricultura “Luiz de Queiroz”,
Universidade de São Paulo, para
obtenção do título de Doutor em
Agronomia, Área de concentração:
Irrigação e drenagem.

PIRACICABA
Estado de São Paulo - Brasil
Março - 2002

**CONSTRUÇÃO, CALIBRAÇÃO E ANÁLISE DE FUNCIONAMENTO DE
LISÍMETROS DE PESAGEM PARA DETERMINAÇÃO DA
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CULTURA DA LIMA ÁCIDA ‘TAHITI’** (*Citrus
latifolia* Tan.)

LUÍS FERNANDO DE SOUZA MAGNO CAMPECHE
Engenheiro Agrônomo

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

Tese apresentada à Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Doutor em Agronomia, Área de concentração: Irrigação e drenagem.

PIRACICABA
Estado de São Paulo - Brasil
Março – 2002

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP

Campeche, Luis Fernando de Souza Magno

Construção, calibração e análise de funcionamento de lisímetros de pesagem para determinação da evapotranspiração da cultura da lima ácida 'Tahiti' (*Citrus latifolia* Tan.) / Luis Fernando de Souza Magno Campeche. - - Piracicaba, 2002.

67 p. : il.

Tese (doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2002.
Bibliografia.

1. Consumo de água 2. Irrigação por gotejamento 3. Limão I. Título

CDD 634.334

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

À minha família e aos meus amigos, pelo apoio, incentivo e compreensão pela minha ausência nos momentos de alegria.

OFEREÇO

A Nádía Rossi, que, pela sua simplicidade me fez perceber

AGRADECIMENTOS

A Deus, criador de todo o universo, detentor de todas as respostas.

Ao Departamento de Engenharia Rural da ESALQ/USP, pela acolhida e apoio oferecido durante a realização do curso.

Ao Prof. Marcos Vinícius Folegatti, amigo, colega e orientador pelo apoio incondicional e total confiança em mim depositada.

A fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo FAPESP pela concessão da bolsa de estudo.

Aos Professores do Departamento de Engenharia Rural e Ciências Exatas ESALQ/USP pelos ensinamentos, amizade e a enorme contribuição para minha formação profissional.

Aos Professores Nilson Villa Nova e Antonio Roberto Pereira pelo incentivo, admiração, ensinamentos e acima de tudo a amizade e consideração recíproca.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Rural, em especial Hélio, Gilmar, César, Sr. Antonio, Lino e Juarez pelo convívio e contribuição para realização deste trabalho.

As secretárias Beatriz, Davilmar, Sandra, Vanda, Marcia, Roseli, Fernanda e Amália pela simpatia e convivência.

Aos amigos e colegas Adriana, Tedy, Leonardo, Glenda, Sérgio, Raquel, Rene, Enio, Fabiano, Chico, Vital, Anderson, Fernando Mendonça, Thales, Tamara, Dilão, Ronaldo, Nicolás, Selma, Tangerino, pela convivência harmoniosa durante a minha estadia em Piracicaba.

A Maurício Coelho, amigo e colega, por sua ajuda durante a execução e análise do trabalho, sempre alegre e prestativo.

Ao GPID (Grupo de Práticas em Irrigação e Drenagem) pela ajuda durante a implantação do experimento.

A todos que contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO.....	vii
SUMMARY.....	iv
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	4
2.1 A planta.....	4
2.2 Evapotranspiração de pomar.....	5
2.3 Lisímetro de pesagem.....	7
3 CONSTRUÇÃO DE LISÍMETROS DE PESAGEM PARA DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM POMAR DE LIMA ÁCIDA ‘TAHITI’ (<i>Citrus latifolia</i> Tan.).....	11
Resumo.....	11
Summary.....	12
3.1 Introdução.....	12
3.2 Material e Métodos.....	14
3.2.1 Descrição da área experimental.....	14
3.2.2. Escavação dos lisímetros.....	15
3.2.3 Estrutura das paredes externas dos lisímetros.....	15
3.2.4 Construção das sapatas.....	16
3.2.4.1 Distância da célula de carga ao centro do lisímetro.....	16
3.2.4.2 Lisímetros 1 e 2.....	17
3.2.4.3 Lisímetros 3 e 4.....	18
3.2.5 Construção das caçambas metálicas.....	19
3.2.6 Sistema de drenagem.....	20
3.2.7 Preenchimento do lisímetro com solo.....	22
3.2.8 Instrumentação.....	22
3.3 Resultados e Discussão.....	23
3.4 Conclusões.....	29
4 CALIBRAÇÃO E ANÁLISE DO DESEMPENHO DE QUATRO LISÍMETROS DE PESAGEM	

BASEADOS EM CÉLULAS DE CARGA.....	30
Resumo.....	30
Summary.....	31
4.1 Introdução.....	31
4.2 Material e Métodos.....	33
4.2.1 Calibração.....	33
4.2.2 Análise de desempenho.....	36
4.3 Resultados e Discussão.....	38
4.4 Conclusões.....	45
5 EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA LIMA ÁCIDA ‘TAHITI’ (<i>Citrus latifolia</i> T.) COM O USO DE..	
LISÍMETROS DE PESAGEM.....	46
Resumo.....	46
Summary.....	47
5.1 Introdução.....	47
5.2 Material e Métodos.....	49
5.3 Resultados e Discussão.....	52
5.4 Conclusões.....	58
6 CONCLUSÕES GERAIS.....	59
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	61

**CONSTRUÇÃO, CALIBRAÇÃO E ANÁLISE DE FUNCIONAMENTO DE
LISÍMETRO DE PESAGEM PARA DETERMINAÇÃO DA
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CULTURA DA LIMA ÁCIDA ‘TAHITI’ (*Citrus
latifolia* Tan.)**

Autor: LUÍS FERNANDO DE SOUZA MAGNO CAMPECHE

Orientador: Prof. MARCOS VINÍCIUS FOLEGATTI

RESUMO

Este trabalho tem como principais objetivos (a) a construção, calibração e operação de lisímetros de pesagem baseado em célula de carga para monitorar o consumo de água por árvores *in situ* em pomar; (b) a medida da evapotranspiração no estágio inicial de implantação de um pomar de lima ácida ‘Tahiti’ (*Citrus latifolia* Tan.) e (c) a determinação do coeficiente de cultivo (Kc) nos estágios iniciais de desenvolvimento, em Piracicaba-SP. Para tanto, foram construídos e calibrados quatro lisímetros de pesagem para determinação da evapotranspiração, sendo o primeiro de 0,8 m de diâmetro e 0,6 m de profundidade (1), o segundo com 1,6 m de diâmetro e 0,7 m de profundidade (2), o terceiro com 2,7 m de diâmetro e 0,8 m de profundidade (3) e o quarto com 4 m de diâmetro e 1,3 m de profundidade (4). Foi implantado um pomar de lima ácida ‘Tahiti’ enxertado em “citromelo swingle”, no espaçamento de 7 m X 4 m, e irrigado por gotejamento, com 4 emissores de 4 litros por hora cada. A evapotranspiração de referência foi estimada pelo modelo de Penman-Monteith FAO-56. Com base nos resultados, verificou-se que os lisímetros construídos apresentaram boa performance, detectando as variações de massa ao longo de um dia, sendo aconselhável

a eliminação dos dados diários quando ocorre precipitações intermitentes. Observou-se uma alta linearidade dos equipamentos com baixa histerese, sendo encontrado coeficiente de determinação de 0,99, sensibilidade suficiente para detecção de mudança de massa menores que 0,04 mm e valores de exatidão menores que 0,1 mm. O equipamento que utilizou a maior percentagem de área entre as paredes interna e externa (lisímetro 1) representou uma maior superestimativa da somatória dos valores das diferenças negativas em comparação com a determinação da evapotranspiração pelo método padrão em função da maior oscilação provocada pelo vento. A variação dos valores de K_c foram de 0,0131 a 0,049 para o lisímetro 1 e 0,0215 a 0,0531 para o lisímetro 2. Foi notado valores superiores de evapotranspiração do lisímetro 1 em comparação com o lisímetro 2 em função do efeito borda. Durante o período úmido, foi observado valores de evapotranspiração maiores no lisímetro 1 em comparação ao lisímetro 2, devido à evaporação do solo. De um modo geral, valores de coeficiente de cultivo determinados no presente trabalho poderão ser utilizados para manejo de irrigação em citrus quando se utiliza sistema de irrigação localizada.

**CONSTRUCTION, CALIBRATION AND ANALYSIS OF THE OPERATION OF
A WEIGHING LYSIMETER TO DETERMINE THE EVAPOTRANSPIRATION
OF “TAHITI” LIME (*Citrus latifolia* Tan.)**

Author: LUÍS FERNANDO DE SOUZA MAGNO CAMPECHE

Adviser: MARCOS VINICIUS FOLEGATTI

SUMMARY

This study had as main objectives a) the construction, calibration and operation of load cell based weighing lysimeters to measure the water consumption of orchard trees *in situ*; b) the evapotranspiration measurement at the first stages after plantation of a “Tahiti” lime (*Citrus latifolia* Tan.) orchard; and c) the crop coefficient (Kc) determination for the initial development stages, in Piracicaba-SP. Four weighing lysimeters were constructed and calibrated to determine the evapotranspiration, with the following dimensions: (1) 0.8 m in diameter and 0.6 m deep; (2) 1.6 m in diameter and 0.7 m deep; (3) 2.7 m in diameter and 0.8 m deep; and (4) 4 m in diameter and 1.3 m deep. The lime orchard was planted using grafts of “citromelo swingle”, spaced at 7 x 4 m, and irrigated by a dripping irrigation system, using four emitters (4 liters per hour each). Reference evapotranspiration was estimated using the Penman-Monteith FAO-56 method. Based on the results, it was observed that the lysimeters constructed presented good performance, detecting mass variations along the day, although it was not advisable to use daily data when intermittent rain occurred. A high linearity of the equipment was observed, along with small hysteresis, a high coefficient of determination (0.99), enough sensibility to detect mass changes smaller than 0.04 mm, and accuracy

values smaller than 0.1 mm. The lysimeter with higher percentage of area between internal and external walls (lysimeter 1) presented larger overestimates of the sum of the negative difference when compared to the evapotranspiration determined by the standard method occurred due to a higher oscillation provoked by wind. Kc values varied from 0,0131 to 0,049 for lysimeter 1 and 0,0215 to 0,0531 for lysimeter 2. Higher evapotranspiration values measured at lysimeter 1 in comparison to lysimeter 2 occurred due to the border effect. During the wet period, evapotranspiration values were larger at lysimeter 1 in comparison to lysimeter 2 due to soil evaporation. In general, the crop coefficient values calculated in this study can be applied for citrus irrigation management when dripping irrigation system is used.

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor mundial de frutas "in natura", entretanto ocupa o vigésimo lugar entre os países exportadores por destinar apenas 1% de sua produção ao mercado externo. Nos últimos três anos as exportações têm alcançado uma cifra de 150 milhões de dólares, correspondendo a cerca de 400 a 500 mil toneladas de frutas exportadas. Os negócios relacionados à fruticultura no Brasil movimentam atualmente cerca de 17 bilhões de reais, contra 16 bilhões da produção de grãos, com área plantada significativamente menor que a de grãos.

Num total de 45 mil ha cultivados com limão no Brasil, o Estado de São Paulo possui 28 mil ha, produzindo 473 mil toneladas, que representa 70% da produção nacional. Devido à carência de estudos ligados à necessidade hídrica da cultura de citros e de informações adequadas para o manejo da irrigação, resulta em projetos de irrigação sub ou super dimensionados, com retorno econômico insuficiente para justificar sua contínua aplicação. Para tanto, torna-se necessário um estudo que determine a necessidade hídrica da cultura do limão irrigada em suas diferentes fases, sendo possível com isso estabelecer práticas de manejo capazes de alterar o crescimento, o rendimento, e a qualidade do fruto, tornando a atividade mais lucrativa.

Para estudo da necessidade de água de culturas tem sido utilizados métodos baseados no solo (balanço hídrico), métodos micrometeorológicos (razão de bowen, aerodinâmico, Penman-Monteith etc.) e também medidas diretas na planta (fluxo de seiva, temperatura da folha). O método do balanço hídrico para determinação da necessidade hídrica das culturas parte do princípio da contabilização das entradas e saídas de água num dado volume de solo durante um certo período de tempo. Esse método, aparentemente simples apresenta alguns inconvenientes metodológicos como,

por exemplo, a representatividade da profundidade de solo e o volume que está se estudando, que dependerá da característica de distribuição do sistema radicular da cultura. Vieira (1993), trabalhando com o método do balanço hídrico e microaspersão em um pomar de lima ácida “tahiti” com 3 anos e meio de idade afirmou que a profundidade da camada do solo a ser considerada para fins de manejo da irrigação deve ser de 0,6 m.

A utilização de métodos microclimáticos de estimativa de perda de água pela cobertura vegetal, vem a ser uma alternativa para a estimativa da evapotranspiração, com a vantagem de que tais métodos tem por base as relações micrometeorológicas que estão ocorrendo numa cobertura vegetal, levando em conta a especificidade da cobertura. Em uma situação de pomar, em que há uma descontinuidade espacial das plantas, a utilização de tais métodos é limitada, pois as árvores incrementam a rugosidade da superfície, alterando as variáveis meteorológicas (temperatura e umidade relativa do ar, velocidade do vento) próximas a elas. Pereira et al. (2001) relatou as principais dificuldades do emprego de métodos micrometeorológicos para a estimativa da evapotranspiração de lima ácida “tahiti”. Esse autor ressaltou que o uso desses métodos sob vegetação de grande porte e esparsa deve ser feita com precaução, por se tratar de situação diversa daquela para as quais o método foi desenvolvido.

O método do balanço de calor permite a estimativa do fluxo de seiva da árvore ou dos ramos. O princípio de aplicação desse método é uma medida volumétrica do fluxo de seiva em plantas, que podem ser admitido como equivalente à transpiração. Apesar desse método ter recebido grande atenção nos últimos tempos, a sua aplicação ainda está sendo testada, pois ainda existem algumas restrições quantos ao seu uso, como verificado por Trejo-Chandia (1997), que encontrou valores de fluxo de seiva maiores que os da transpiração em períodos de maior demanda hídrica, em mudas de limão. Esse autor recomenda ainda o desenvolvimento de materiais que permitam o isolamento térmico para minimizar efeitos externo como fonte de erro. Em plantas lenhosas e adultas, como no caso de lima ácida “tahiti” a grande dimensão e a irregularidade dos troncos surge como uma dificuldade operacional a mais para o

emprego da técnica, somada ao fato de que não existe uma padronização de conversão de unidades entre transpiração da planta e evapotranspiração do pomar quando se trata de plantas isoladas, como verificado por Marin et al. (2001).

O uso de lisímetros de pesagem serve como uma ferramenta padrão em estudos de perda de água das culturas, pois tais equipamentos medem diretamente a evapotranspiração de culturas agrônômicas que cobrem ou não totalmente o solo. Esses equipamentos quando bem desenhados, calibrados e manejados medem precisamente e representativamente a evapotranspiração das culturas, integrando fatores ambientais que regem tal processo. Aboukhaled (1982) afirmava que lisímetros de pesagem são os melhores equipamentos para medir adequadamente a evapotranspiração das culturas. Com o advento desses equipamentos e da microeletrônica, outros métodos de estimativa de perda de água estão sendo aperfeiçoadas e calibradas a partir de um método padrão, universalmente usados como é o caso de lisímetros de pesagem.

A difusão e a disponibilidade comercial de sensores eletrônicos como a célula de carga permitiram o uso cada vez mais comum e freqüente na construção de lisímetros de pesagem, antes tido como equipamentos caros devido à complexidade de sistemas mecânicos e de alto custo de manutenção. Allen & Fischer (1990) comprovaram a idéia de que lisímetros apoiados totalmente sobre células de carga poderiam ser utilizados em estudos de perda de água pelas culturas como alternativa à lisímetros que utilizam partes móveis no seu mecanismo de pesagem como balanças e contrapesos.

Este trabalho tem como principais objetivos (a) a construção, calibração e operação de lisímetro de pesagem baseado em célula de carga para monitorar o consumo de água por árvores *in situ* em pomar; (b) a medida da evapotranspiração no estágio inicial de implantação de um pomar de lima ácida 'Tahiti' (*Citrus latifolia* Tan) e (c) a determinação do coeficiente de cultivo nos estádios iniciais de desenvolvimento.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A planta

A limeira ácida ‘Tahiti’ (*Citrus latifolia* Tan) é uma planta de tamanho médio a grande, vigorosa, expansiva, curvada, e quase sem espinhos. De origem tropical, o limão Tahiti não é, na verdade um limão verdadeiro, mas sim uma lima ácida, de folhagem densa, com folhas de tamanho médio, lanceoladas e com pecíolos alados. A floração ocorre durante quase todo ano, principalmente de setembro a outubro. Os frutos apresentam tamanho médio, ovais, oblongos ou levemente elípticos com a base usualmente arredondada. A Lima ácida do ‘Tahiti’ (*Citrus latifolia* Tan) é, dentre as espécies cítricas, a de maior precocidade, apresentando, em geral uma produção significativa já a partir do terceiro ano, mas, só a partir do quinto ano é que se obtém rendimentos econômicos (Passos et al., 1977; Figueiredo, 1986; Marcondes, 1991, Gayet et al., 1995).

O Estado de São Paulo é o maior produtor Brasileiro, representando quase 70% do total, com rendimentos de pomares comerciais que variam de acordo com a fase de produção: 8 a 15 kg planta⁻¹ com três anos de idade; 23 a 37 kg planta⁻¹ com quatro anos de idade; 64 a 86 kg planta⁻¹ com cinco anos; de 68 a 141 kg planta⁻¹ com seis anos. Aos 11 anos, a produtividade alcança 113 kg planta⁻¹ ou aproximadamente 400 mil frutos por hectare. Plantas com 12 a 15 anos de idade produzem 317, 8 kg de frutos por ano, mas o normal por árvore é de 204 a 249 kg planta⁻¹. Pomares com populações de 370 a 494 plantas por hectare desenvolve-se em forma de cerca viva e não produzem muitos frutos por planta em decorrência da competição por nutrientes e luminosidade (Coelho, 1993).

O limão Tahiti, como as demais plantas cítricas, adapta-se bem a diferentes tipos de solo, desde muito arenoso a relativamente argiloso. Os solos mais adequados são os leves, bem arejados, profundos e sem impedimentos. Para o Estado de São Paulo, os índices de boa fertilidade dos solos são: teor de matéria orgânica entre 1,5 e 4%, pH medido em resina entre 14 e 40 ppm, potássio entre 0,2 e 0,3 mg/100ml; cálcio entre 1,5 e 4,5 mg/100ml e magnésio entre 0,5 e 1,5 mg/100ml (Gayet, 1991).

2.2 Evapotranspiração de pomar

O termo evapotranspiração compreende a perda combinada de água de uma superfície úmida (solo e planta) e pela transpiração das plantas. Tanto a evaporação como a transpiração ocorrem simultaneamente na natureza e não é fácil a distinção entre os dois processos. A evaporação é determinada pela disponibilidade de água na camada superficial do solo e pelo saldo de radiação que chega nessa mesma superfície. No estágio inicial de desenvolvimento de uma determinada cultura, a fração da evaporação é alta, diminuindo durante o período de crescimento, sombreando o terreno. À medida que cultura se desenvolve, a transpiração vem a ser o principal processo (Allen et al., 1998)

A evapotranspiração da cultura (E_c) difere da evapotranspiração de referência (E_o) pelo tipo de cobertura do solo, propriedade do dossel e a resistência aerodinâmica. Os efeitos das características que distinguem os cálculos da E_o e a E_c são integrados pelo do coeficiente da cultura (K_c) (Allen et al. 1998; Doorenbos & Pruitt, 1977). Os valores de K_c variam em função do estágio de crescimento da cultura, transpiração das plantas, superfície molhada do solo, condutividade hidráulica e a energia disponível para evaporação da água pelo solo. Pereira et al. (1997) afirma que o K_c é uma função do índice de área foliar (IAF), segundo esse autor, esse coeficiente elimina a idade da cultura, pois diferentes cultivares da mesma espécie tem crescimento e desenvolvimento distintos.

No caso de pomar, em que a cultura cobre de forma descontínua a superfície do solo a estimativa ou mesmo a determinação da evapotranspiração são tratadas de forma

diferenciada. Pereira et al. (1997) afirma que os principais modelos matemáticos foram desenvolvidos tomando-se como padrão uma superfície vegetada por plantas de pequeno porte e que métodos diretos como lisímetros contém apenas uma porção do solo e apenas uma árvore, interferindo com o sistema radicular. Além disso, os sistemas de irrigação utilizados em pomar em fornecimento de água localizados (micro-aspersão e gotejamento), o conhecimento da transpiração da planta é de fundamental importância, principalmente em locais e períodos secos, em que a transpiração representa a maior parcela da evapotranspiração.

Vieira (1994) trabalhando com micro-aspersão em um pomar de limeira ácida “Tahiti” variedade quebra galho sobre porta enxerto de limão cravo, com três anos e meio de idade, e espaçamento entre plantas de 5 m X 7 m em Pinhal-SP, afirmou que a profundidade efetiva do sistema radicular foi de 0,6 m e a maior parte das raízes localizava-se entre 0,7 a 1 m do caule. Esse autor estimou valores de K_c entre 0,76 e 0,9 em um ano completo de estudo.

Boman & Syvertsen (1991) montou uma bateria de 21 lisímetros de drenagem de 3,5 m de diâmetro e 1 m de profundidade para determinação da evapotranspiração de um pomar de laranja valência sobre porta enxerto de citromelo swingle na Flórida, EUA. Durante um ano (Novembro de 89 a Novembro de 90) foi observado uma evapotranspiração média de 3,5 mm dia⁻¹, com um pico de 7,6 mm dia⁻¹ no verão (Julho) e K_c de 0,5 no inverno (Novembro a Março).

Marin (2000) utilizou o método de fluxo de seiva para estimativa da transpiração e o método aerodinâmico para estimativa da evapotranspiração buscando encontrar uma relação entre essas duas variáveis em um pomar de limeira ácida “Tahiti” irrigada por micro-aspersão, com aproximadamente 8 anos de idade e espaçamento de 7 m X 8 m, em Piracicaba-SP. Esse autor concluiu que a transpiração foi responsável por 58% da evapotranspiração no verão e 100 % no inverno, porém com grande dispersão dos pontos.

2.3 Lisímetros de pesagem

Lisímetros têm sido utilizados por mais de três séculos para estudos das relações entre água, solo e plantas. Inicialmente os lisímetros foram desenvolvidos para quantificação e qualificação da água do solo percolada em estudos hidrológicos. Thornthwaite et al. (1946) foi o primeiro pesquisador a usar esse equipamento para medidas de evapotranspiração em condições de campo (Gebet & Cuenca, 1991).

Lisímetros são grandes caixas cheias de solo, localizados em campo apresentando uma superfície nua ou coberta por uma vegetação. Eles podem ser usados para determinação da evapotranspiração das culturas ou ainda somente a evaporação do solo (Aboukhaled et al., 1982; Howell et al., 1991; Wright, 1991; Gebet, 1991; Khan et al., 1993).

Muitos autores, entre eles Aboukhaled et al., (1982) e Howell et al. (1991) consideram lisímetros de pesagem como sendo o melhor equipamento disponível para medir com acurácia a evapotranspiração de referência e de culturas, como também para calibração de modelos. Howell et al. (1985) afirmaram que lisímetros de pesagem são os mais precisos quando calculam evapotranspiração em períodos menores que um dia.

A literatura reporta muitos trabalhos envolvendo construção desse tipo de aparelho. Lisímetros têm sido feitos a partir de diversos desenhos, cada qual baseado em um requerimento específico, que depende da cultura estudada, solo, clima, disponibilidade de materiais, tecnologia e principalmente os custos envolvidos na sua construção Khan et al. (1993). Schneider et al. (1998) afirmaram que os custos envolvidos para construção desses equipamentos são determinados pelo seu tamanho, disponibilidade de material e pessoal qualificado para montagem. Algumas décadas atrás, o uso de lisímetros de pesagem por parte da maioria das instituições de ensino e pesquisa era uma idéia remota, mas com a popularização da microeletrônica, esses equipamentos estão ganhando um novo impulso na pesquisa agrometeorológica.

Pruitt & Angus (1960) e mais tarde Pruitt & Lourence (1985) descreveram a construção daquele que foi o maior lisímetro do mundo, com 29 m² de área por 0,96 m de profundidade. Esse equipamento permitiu o desenvolvimento de modelos que descrevem a saída da água para a atmosfera, bem como testes da teoria dos transportes atmosféricos. A partir desta época, diversos pesquisadores relataram em seus trabalhos uma infinidade de tipos e tamanhos de lisímetros de pesagem, desde os chamados micro lisímetros, com poucos kilos até lisímetros com algumas dezenas de toneladas de massa.

Pesquisadores como Allen & Fischer (1991) em Utah, desenvolveram lisímetros de pesagem de baixo custo baseados em células de carga, construídos em chapa de aço com 0,005 m de espessura, com capacidade de 1,21.m³. Schneider et al. (1998) no Texas, reportaram o desenho, instalação e operação de dois grandes lisímetros de pesagem. Silva (1999) no Brasil, instalou um lisímetro de pesagem feito em uma caixa de cimento amianto com 0,92 m² de área e 0,65 m de profundidade. Mais tarde, esse mesmo autor montou um equipamento agora feita em chapa de aço carbono e uma área de 1,15 m² (Silva, 2000).

A calibração do lisímetro é uma das etapas mais importantes durante a implantação do equipamento, pois, calibrações mal feitas levam a interpretações inconsistentes dos valores de evapotranspiração, principalmente quando se trabalha em curtos períodos de tempo.

Howell et al. (1995) e Schneider et al. (1998), montaram e calibraram lisímetro de grande porte (acima de 45 Mg), encontrando um alto coeficiente de determinação. Para tanto, esses autores utilizaram uma sistema de alavancas e contrapesos, com a finalidade de ampliar a escala utilizada em aproximadamente 100:1, ou seja, a cada 100 kg de variação de massa do sistema, a célula de carga registrava apenas 1 kg. A vantagem desse sistema é de poder utilizar uma célula de menor capacidade e conseqüentemente maior precisão do equipamento.

Utilizando um sistema de menor capacidade, Allen & Fisher (1991) calibraram um lisímetro de pesagem utilizando 3 células de cargas com capacidade de 910 kg cada.

Utilizando o mesmo procedimento e metodologia, Silva et al. (1999) encontrou uma alta concordância entre pesos padrões e o peso medido pelas células de carga. Esses autores ressaltaram a necessidade de verificação da linearidade e histerese antes do funcionamento do sistema em campo.

Com a finalidade de calibrar dois lisímetros com dimensões diferentes, Campeche et al. (2001) utilizou um sistema de alívio de peso com uma única célula de carga para cada lisímetro. Foi verificado um alto coeficiente de determinação r^2 (0,99) nos dois equipamentos, sugerindo que a metodologia empregada foi adequada para este tipo de equipamento.

Apesar de ser uma ferramenta padrão em estudos de evapotranspiração, em geral os lisímetros apresentam alguns inconvenientes. Em uma revisão detalhada sobre este tema, Sedyama (1996) cita que é muito difícil manter as condições internas dos lisímetros iguais ou semelhantes às condições externas e vice versa. Diferenças entre estádios de desenvolvimento também são notadas, podendo ser significativa, com reflexo direto nos valores de coeficientes de cultura. Howell et al. (1995) afirma ainda que a massa do lisímetro é afetada por qualquer peso que incide diretamente sobre o equipamento, principalmente a força exercida pelo vento. Esses autores constataram que velocidades superiores a 5 m/s aumentam o desvio padrão das escalas e que o efeito dos ventos podem ser minimizados com o período de integração das leituras, mas nunca eliminados.

Allen & Fischer (1991) desenvolveram 2 tipos de lisímetros de pesagem. O primeiro utilizava células de carga acima da superfície do solo, e o segundo abaixo do equipamento. Os autores chegaram à conclusão que quanto menor fossem os efeitos térmicos tanto do solo como do ar, melhor a performance do equipamento, sugerindo que esses efeitos podem ser minimizados pelo seu desenho e local de inserção da célula de carga, abaixo da caçamba metálica.

Allen et al. (1991) já alertavam para o fato de extraplações feitas a partir de medidas lisimétricas. Os autores afirmam que esses equipamentos medem valores

pontuais de evapotranspiração e cuidados devem ser tomados quando se analisam essas medidas para caracterizar a evapotranspiração de uma grande área cultivada. Segundo esses autores, a finalidade do lisímetro é de justamente medir uma amostra representativa de somente uma dimensão (vertical) da evapotranspiração bem como as trocas de energia de uma cultura. Partindo desse princípio, é essencial que o lisímetro seja circundado por uma vegetação representativa de uma dimensão da evapotranspiração. Variáveis como espaçamento das paredes entre a parte externa e interna, a área que a vegetação ocupa dentro do lisímetro, radiação e advecção térmicas oriundas das paredes, altura dos anéis e entrada de calor sensível (efeito oásis), sem dúvidas são as maiores causas de erros de interpretações de medidas lisimétricas.

3 CONSTRUÇÃO DE LISÍMETROS DE PESAGEM PARA DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM POMAR DE LIMA ÁCIDA ‘TAHITI’ (*Citrus latifolia* Tan.)

Resumo

Este trabalho teve como principal objetivo, descrever a construção e montagem de quatro lisímetros de pesagem baseado em células de carga, sendo o primeiro de 0,8 metro de diâmetro e 0,6 metro de profundidade, o segundo com 1,6 metro de diâmetro e 0,7 metro de profundidade, o terceiro com 2,7 metros de diâmetro e 0,8 metro de profundidade e o quarto com 4 metros de diâmetro e 1,3 metros de profundidade. Tais lisímetros foram construídos para determinação da evapotranspiração do pomar da limeira ácida “Tahiti”(*Citrus latifolia* Tan.), em todas as fases do crescimento e desenvolvimento da cultura. Para os dois primeiros lisímetros, foram utilizadas chapas de aço carbono, mesmo material utilizado para confecção de todas caçambas metálicas internas, e para os demais as paredes externas foram feitas de concreto armado e tanques de drenagem acoplados às caçambas metálicas internas. O perfil do solo foi escavado de modo a separar as camadas existentes e o preenchimento foi feito com a ordem inversa da retirada das camadas do solo. Todas as células de carga foram acopladas no datalogger que fazia médias de leituras a cada 20 minutos. Os lisímetros detectaram em condições ambientais distintas variações de massa provocado por chuva, drenagem e evapotranspiração, permitindo concluir que a metodologia empregada no desenvolvimento e montagem dos lisímetros de pesagem pode ser usada para estudos da evapotranspiração das culturas.

Palavras-Chaves: Evapotranspiração, Lisímetro de pesagem, Construção.

CONSTRUCTION OF WEIGHING LYSIMETERS TO DETERMINE THE EVAPOTRANSPIRATION IN A “TAHITI” LIME (*Citrus latifolia* T.) ORCHARD

Summary

This study had the objective of describing the construction and assembling of four load cell based weighing lysimeters. The first one is 0.8 m in diameter and 0.6 m deep; the second, 1.6 m in diameter and 0.7 m deep; the third one is 2.7 m in diameter and 0.8 m deep, and the fourth lysimeter is 4.0 m in diameter and 1.3 m deep. These lysimeters were built to determine the evapotranspiration of a “Tahiti” lime orchard (*Citrus latifolia* T.) along all its development phases. The internal tanks of the lysimeters were made using carbon steel plates, the same material used in the external walls of the two smaller lysimeters. The two larger lysimeters have the external wall in reinforced concrete and drainage tanks coupled to the internal tank. The soil profile was excavated so that the soil layers were separated, and the lysimeter filling was done in the inverse order of excavation, keeping the original sequence of the soil layers. The load cells were connected to a datalogger used to store the average of the measurements every 20 minutes. At different environmental conditions, the lysimeters detected mass variations due to rainfall, drainage and evapotranspiration, what allows the conclusion that the weighing lysimeters were adequately assembled to study crop evapotranspiration.

Key words: evapotranspiration; weighing lysimetry; construction.

3.1 Introdução

Lisimetria de pesagem têm sido largamente utilizada em pesquisas agrometeorológicas, por ser um método direto para determinação da evapotranspiração. O lisímetro consiste em um tanque cheio de solo, com finalidade de representar um ambiente específico, e, por balanço de massa, determinam a evapotranspiração das culturas. Diversos autores reportam o uso de lisímetros de pesagem como ferramenta padrão em estudos de perda de água das culturas, seja na determinação da

evapotranspiração, como também na calibração de modelos agrometeorológicos de estimativa. Existe um grande número de trabalhos envolvendo tamanhos, formas e tipos diferentes de construção desses equipamentos, cada qual com a sua adaptação local de solo, cultura, condições climáticas, disponibilidade de material, tecnologia e os custos envolvidos para sua construção.

De acordo com Guiting (1991), a área de um lisímetro é inversamente proporcional à razão da evapotranspiração, ou seja, quanto maior a sua área, menor é a quantidade de água evapotranspirada quando comparados nas mesmas condições de campo com lisímetros de menor área. Esse autor afirma que lisímetros com área superior a 6 m^2 podem representar a evapotranspiração de uma cultura ocorrida em campo.

Lisímetros de área menor do que 2 m^2 estão sendo muito utilizados hoje em dia em pesquisas de evapotranspiração das culturas, pois além de serem mais facilmente construídos, os custos também são menores. Além do mais, equipamentos de menor porte permitem a separação entre os processos de transpiração e evaporação do solo em culturas de pequeno porte, pois os mecanismos envolvidos na sua construção, como menor capacidade da célula de carga, distância das paredes e área evaporante são capazes de detectar pequenas mudanças de massa do sistema, principalmente quando se trabalha com culturas que não cobrem uniformemente o solo, como no caso de culturas perenes.

Em fase inicial da cultura de árvores isolados como citros, a determinação da evapotranspiração por meio de lisímetros de pesagem requer maior sensibilidade do sistema para aumentar a confiabilidade dos dados gerados. A cultura, nesta fase, apresenta pequeno porte, e portanto a taxa de evapotranspiração menor e a turbulência do sistema será maior devido à sensibilidade do equipamento em detectar mudança de massa provocada pela ação dos ventos, dificultando a separação da evaporação do solo e a transpiração da planta. Uma das formas de se aumentar a sensibilidade do sistema é a diminuição da capacidade da célula de carga utilizada com a diminuição da massa total do equipamento. Porém, essa medida pode não ser a ideal, pois quanto menor o

lisímetro, a planta fica sujeita a condições estressantes, o qual não ocorrem em ambiente externo ao lisímetro, como o maior suscetibilidade ao estresse hídrico e nutricional, pois o sistema radicular ocupa um menor volume de solo e as drenagens são frequentes em períodos chuvosos. Em culturas perenes de grande porte como citros, a utilização de pequenos lisímetros fica limitada aos primeiros anos de cultivo, quando a planta ainda é pequena.

O objetivo desse trabalho foi de reportar a construção de quatro lisímetros de pesagem com as seguintes dimensões: lisímetro 1 com 0,8 m de diâmetro e 0,6 m de profundidade, lisímetro 2 com 1,6 m de diâmetro 0,7 m de profundidade, lisímetro 3 com 2,7 m diâmetro e 0,8 de profundidade e o lisímetro 4 com 4 metros de diâmetro e 1,3 metros de profundidade, construídos de com a finalidade de determinar a evapotranspiração em todas as fases fenológicas da cultura da limeira ácida “Tahiti” (*Citrus latifolia* Tan.).

3.2 Material e Métodos

3.2.1 Descrição da área experimental

Os quatro equipamentos foram montados na área experimental do Departamento de Engenharia Rural da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” ESALQ/USP, em Piracicaba, SP, com as seguintes coordenadas geográficas: 22° 42’ 30’’ de latitude sul, 47° 30’00’’ de longitude oeste, com aproximadamente 546 metros de altitude. O solo do local é classificado como terra roxa estruturada. A declividade média do terreno é de 4%. A Figura 1 mostra a disposição dos lisímetros em campo.

A construção e montagem dos equipamentos em campo se iniciou no mês de março de 2000, sendo concluída no mês de abril do mesmo ano, com aproximadamente 50 dias de duração.

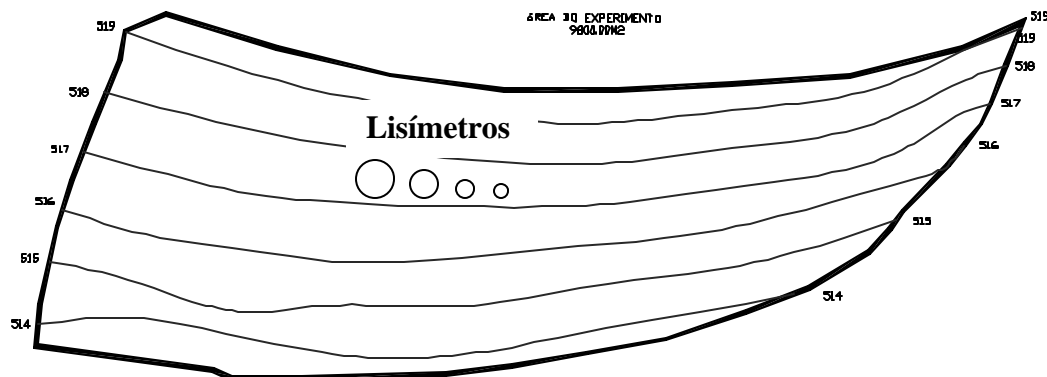


Figura 1 - Disposição dos lisímetros na área experimental

3.2.2 Escavação dos lisímetros

A escavação foi feita manualmente tomando-se o cuidado de separar o solo em camadas de 0,10 m até a profundidade igual à profundidade de cada uma das caixas metálicas. As camadas de solo foram acondicionadas em lonas plásticas, identificadas e armazenadas no próprio local. É importante salientar que a metodologia utilizada na escavação, separação e acondicionamento do solo é necessária para reconstituição das condições iniciais do solo, etapa que exigiu maior tempo empregado.

3.2.3 Estrutura das paredes externas dos lisímetros

Nos lisímetros de 1 e 2, as paredes externas foram feitas de aço carbono com dimensões de 1,7 e 0,9 m de diâmetro e 1 e 0,9 m de profundidade, respectivamente, mesmo material usado para confecção das caixas metálicas internas.

Para os lisímetros 3 e 4, foram construídas paredes externas de concreto armado com espessura de 0,18 m para sustentação do solo circundante e uma abertura possibilitando o acesso ao tanque de drenagem e células de carga (caixa de visita), para viabilizar manutenções nesses lisímetros.

3.2.4 Construção das sapatas

A disposição das sapatas para sustentação da massa do sistema foi triangular com ângulos de 120° entre elas (Figura 2), para permitir uma distribuição uniforme da massa do sistema sobre cada uma das células de carga. O mesmo procedimento foi adotado por Allen & Fisher (1991) e Silva (1996).

3.2.4.1 Distância da célula de carga ao centro do lisímetro

Para uma distribuição equivalente da massa do sistema, as células de carga devem ser posicionadas de tal forma que o raio interno de inserção das células de cargas divida o lisímetro em duas áreas equivalentes, ou seja:

$$A_t - a = a \quad (1)$$

$$(R_t)^2 = 2 r^2 \quad (2)$$

$$r = 0,71 R_t \quad (3)$$

em que;

A_t - Área total do lisímetro

a - Área interna de inserção das células de carga

R_t - Raio total do lisímetro

r - Distância da célula ao centro do lisímetro

É importante salientar que todas as células de carga foram posicionadas sob a caçamba metálica interna. Esse procedimento visa atenuar o efeito direto da radiação

sobre esses sensores. Allen & Fischer (1991) concluíram que a acuracidade do equipamento foi influenciada pelo posicionamento das células, que foi na superfície do solo, gerando instabilidade no sinal elétrico devido à variação de temperatura, afetando diretamente os valores horários de evapotranspiração

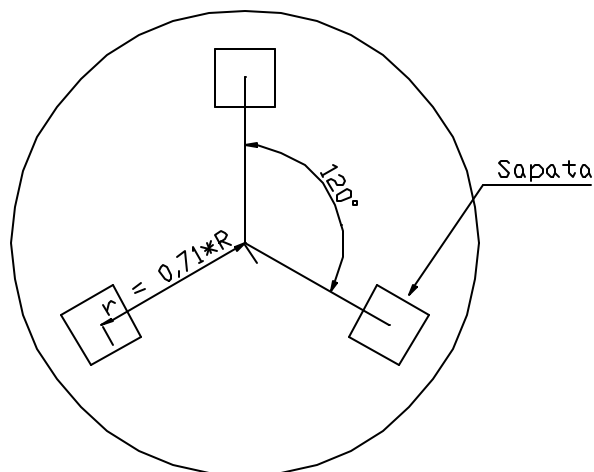


Figura 2 - Vista superior do lisímetro com detalhe da disposição das células de carga.

3.2.4.2 Lisímetros 1 e 2

Para esses lisímetros as sapatas apresentam um degrau, sendo as células de cargas acopladas a uma haste de aço inox de forma circular com 0,2 m de altura. A haste é inserida no concreto por meio de uma abertura tubular com o diâmetro ligeiramente superior, permitindo um encaixe perfeito (Figura 3). A finalidade desse procedimento é facilitar a remoção da célula e permitir um nivelamento do sistema. A área da sapata do lisímetro 1 é de 0,0225 m² (0,15 X 0,15 m) e o lisímetro 2 é de 0,04 m² (0,2 X 0,2 m).

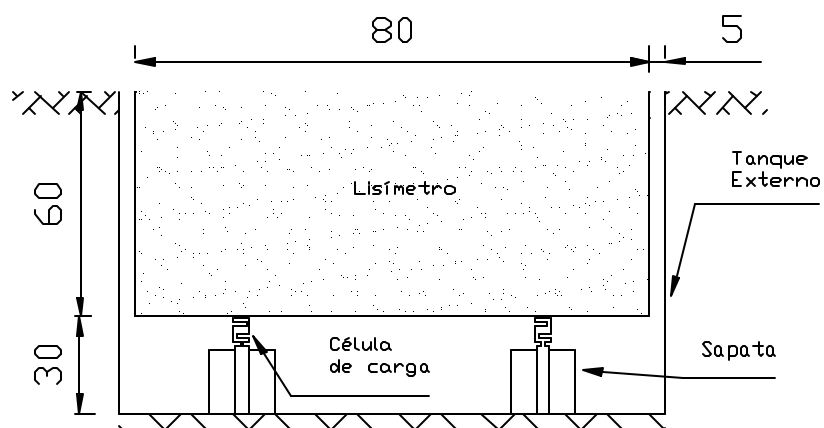


Figura 3 - Esquema de construção e detalhe das sapatas para o lisímetro 1. Medidas em cm.

3.2.4.3 Lisímetros 3 e 4

Para estes lisímetros, foram projetadas sapatas com formato em “L”. Essa configuração permitirá a manutenção das células de carga sem a necessidade de remoção do tanque do lisímetro, o que acarretaria transtornos no decorrer do experimento. Conforme a Figura 4, a finalidade do degrau inferior é a acomodação de um macaco hidráulico, que aliviará totalmente a pressão exercida sobre a célula de carga, facilitando o reparo da mesma em caso de manutenção. O degrau superior servirá de sustentação para a célula de carga posicionada no seu centro. Entre a célula de carga e o degrau superior colocou-se uma chapa de aço carbono de $\frac{3}{4}$ de polegada que acomodará a célula, com finalidade distribuir uniformemente a pressão exercida pelo sistema sobre sapata. A área do degrau superior da sapata do lisímetro 3 é de $0,1\text{m}^2$ ($0,25 \times 0,4$ m) e $0,12\text{m}^2$ ($0,3 \times 0,4$ m) para o lisímetro 4.

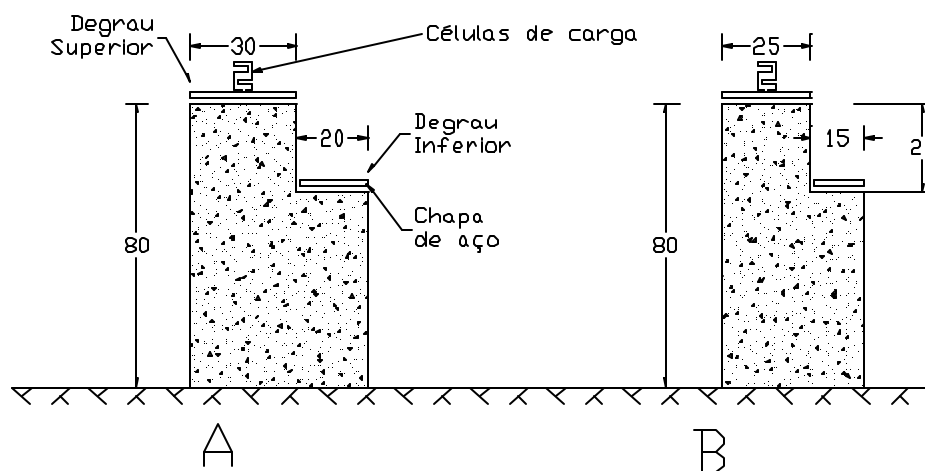


Figura 4 - Esquema da construção das sapatas do lisímetro de 4 (A) e o lisímetro 3 (B).
Medidas em cm.

3.2.5 Construção das caçambas metálicas

O material utilizado na confecção das caçambas metálicas interna foi o aço carbono. Para os lisímetros 4 e 3, as espessura da chapa lateral e o fundo são de 4,7 mm e 6,2 mm, respectivamente. Para uma maior sustentação da caçamba metálica foi obtida utilizando-se uma viga “U” de 150 mm circundando todo o fundo do recipiente na linha de apoio das células de carga (0,71 R). A Figura 5 e 6 ilustram o esquema de construção do lisímetro 4 e o momento de sua colocação no campo, respectivamente. Os lisímetro 1 e 2 apresentam chapas de 4,7 mm de espessura tanto na lateral como no fundo do recipiente metálico.

Apesar do aço carbono ser um material pouco corrosivo, foi aplicada tinta epóxi visando aumentar a sua durabilidade.

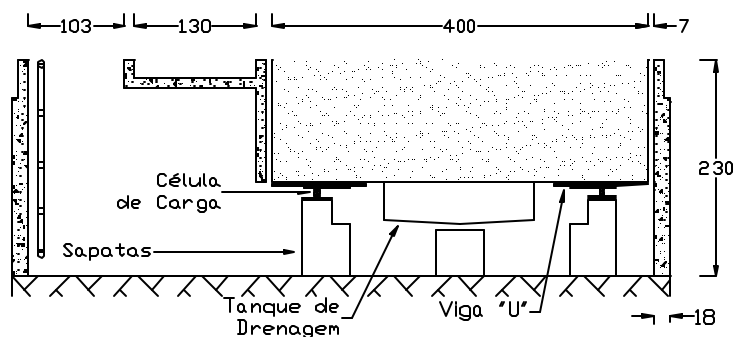


Figura 5 - Esquema de montagem do lisímetro 4. Medidas em cm.



Figura 6 - Momento da instalação do lisímetro 4 em campo.

3.2.6 Sistema de drenagem

Para quantificar as perdas de água por drenagem durante a irrigação e principalmente durante o período das chuvas, foi construído um recipiente metálico acoplado ao sistema dos lisímetros 3 e 4. Para o lisímetro 4 foi construído um tanque de

drenagem de forma circular, de 1,6 m de diâmetro e 0,4 m de altura, com capacidade de armazenagem de 72 mm. Para o lisímetro 3, as dimensões do tanque de drenagem foram de 0,6 m de diâmetro e 0,8 m de altura, com capacidade de armazenagem de 40 mm.

É importante observar que a caixa de drenagem está acoplada à caçamba metálica (Figura 5), sendo também a sua massa registrada pelas células de carga. O mesmo procedimento foi usado com êxito por Phene et al. (1989). O sistema de aquisição de dados armazena a média do valor da massa do equipamento, e a evapotranspiração é calculada pela diferença de massa em um período de tempo, por unidade de área. A quantificação da água drenada é um dos problemas que afetam a determinação da evapotranspiração por meio de lisímetros de pesagem, pois todo tempo utilizado durante esse procedimento deverá ser considerado na análise. A construção deste sistema visou uma maior eficiência durante o processo de drenagem sem prejudicar a medida, além de não permitir o acúmulo excessivo de água na caçamba metálica, o que promoveria efeitos negativos de diminuição da aeração do solo, muito prejudicial à cultura de citrus.

A drenagem dos lisímetros 1 e 2 foram construídos de acordo com Allen & Fischer (1991) e Silva (2000), porém com algumas modificações. Neste caso o sistema possui dois dispositivos de drenagem. O primeiro dispositivo consiste de uma malha de tubo perfurado e involucro com manta de poliéster permitindo a retirada da água gravitacional por cima, com auxílio de uma bomba hidráulica funcionando como piezômetro. O segundo dispositivo adicionado consiste de uma mangueira ligada ao fundo do recipiente metálico com saída para o exterior do sistema, permitindo a retirada da água por gravidade ou acoplando a esta mangueira uma bomba hidráulica. Com a implantação desses dois dispositivos funcionando simultaneamente, espera-se uma redução no tempo de drenagem. As dimensões destes lisímetros facilitarão a rápida retirada do volume de água em excesso do sistema.

3.2.7 Preenchimento do lisímetro com solo

Após a separação do solo e construção dos lisímetros, o preenchimento dos lisímetros foi realizado com solo previamente separado nas suas camadas. No fundo de cada caçamba metálica foi adicionada uma camada de aproximadamente 0,1 m de brita nº 1, com a finalidade de promover uma drenagem de água. Acima desta camada de brita, foi colocada uma manta de poliéster, para que o solo não se misturasse com a brita, facilitando assim a drenagem de água dentro do sistema. A partir desse ponto, foram adicionadas as camadas dos solos na ordem inversa da sua retirada. Para cada camada completada, o solo recebeu uma leve compactação com o auxílio de uma socadora para promover uma maior acomodação deste solo dentro do recipiente metálico. Esse procedimento foi similar para todos os lisímetros. É importante salientar que tal procedimento foi feito com o solo seco, evitando-se a compactação.

3.2.8 Instrumentação

Foi utilizado um datalogger (CR23X, Campbell Sci) para armazenamento dos dados. O datalogger fazia leituras a cada 3 segundos com um período de média de 20 minutos. Como o número de canais foi bem menor que o número de células de carga, optou-se por utilizar um extensor de canais diferenciais (AM 416 Relay Multiplexer, Campbell Sci.).

As células de carga utilizadas foram da Ômega Engineering Inc. modelo LCCA. Para o lisímetro 1, utilizou-se a célula de capacidade de 227 kg cada. Para o lisímetro 2, foi utilizada células de 910 kg, no lisímetro 3 utilizou-se células de 4.536 kg e no lisímetro 4 utilizou-se células de 13.600 kg da capacidade.

3.3 Resultados e Discussão

A Figura 7 ilustra o funcionamento em um dia normal (Dia Juliano 309) para os quatro lisímetros montados em campo. Nota-se que durante o período noturno, ou seja, do final do dia até as primeiras horas da manhã, a quantidade de água saída do sistema é pequena, pois a radiação líquida (R_n), principal variável meteorológica envolvida no processo evapotranspirativo, é negativa ou ainda insuficiente para promover energia necessária para tal processo, ficando o processo evapotranspirométrico dependente das condições aerodinâmicas do ar e da energia acumulada pelo sistema. Apesar da pequena evapotranspiração ocorrida durante o período noturno, esses valores não devem ser negligenciados no somatório da evapotranspiração diária quando se utilizam modelos de estimativas de perda de água e principalmente técnicas de determinação da evapotranspiração. Pereira (1998), trabalhando com lisímetro de pesagem para determinação da evapotranspiração de referência, afirma que em média 15% da evapotranspiração diária é ocorrida durante o período noturno.

Observa-se, para todos os equipamentos que existe uma variação decrescente de massa do sistema ao longo do dia. Em lisimetria de pesagem essa variação decrescente é em decorrência à saída de água, ou seja, a evapotranspiração. Na Figura 7b, é notada a presença de um ponto discrepante nos valores de evapotranspiração. Esse ponto é devido a turbulência causada pela pressão exercida por uma pessoa sobre o equipamento. Mesmo com coletas automatizadas de dados, é indispensável uma avaliação manual e visual dos dados para evitar erros grosseiros na determinação diária da evapotranspiração.

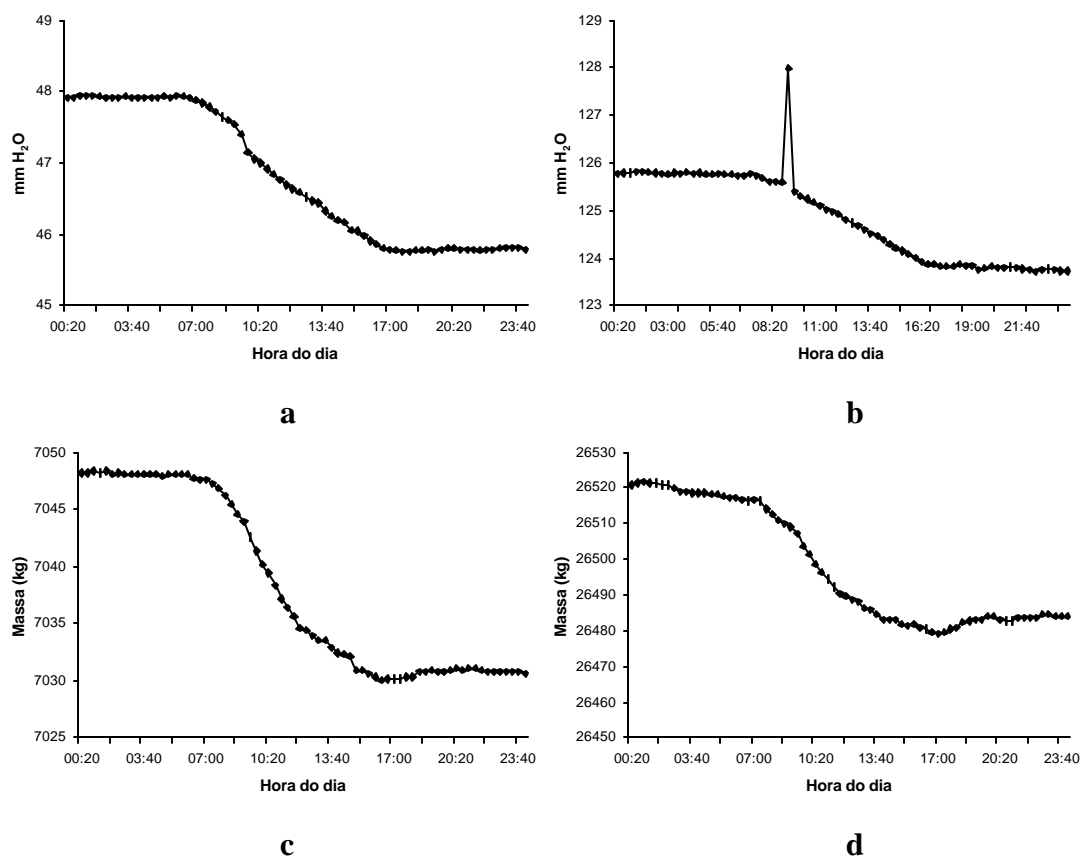


Figura 7 - Performance dos lisímetros 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d) no dia 309.

Quando a variação de massa é positiva, ou seja, crescente, significa que houve entrada de água no sistema, devido a chuvas ou irrigações. Nas Figuras subseqüente (Figuras 8, 9 e 10) são apresentadas as performances dos equipamentos em dias de chuva (Dias 281, 293 e 319).

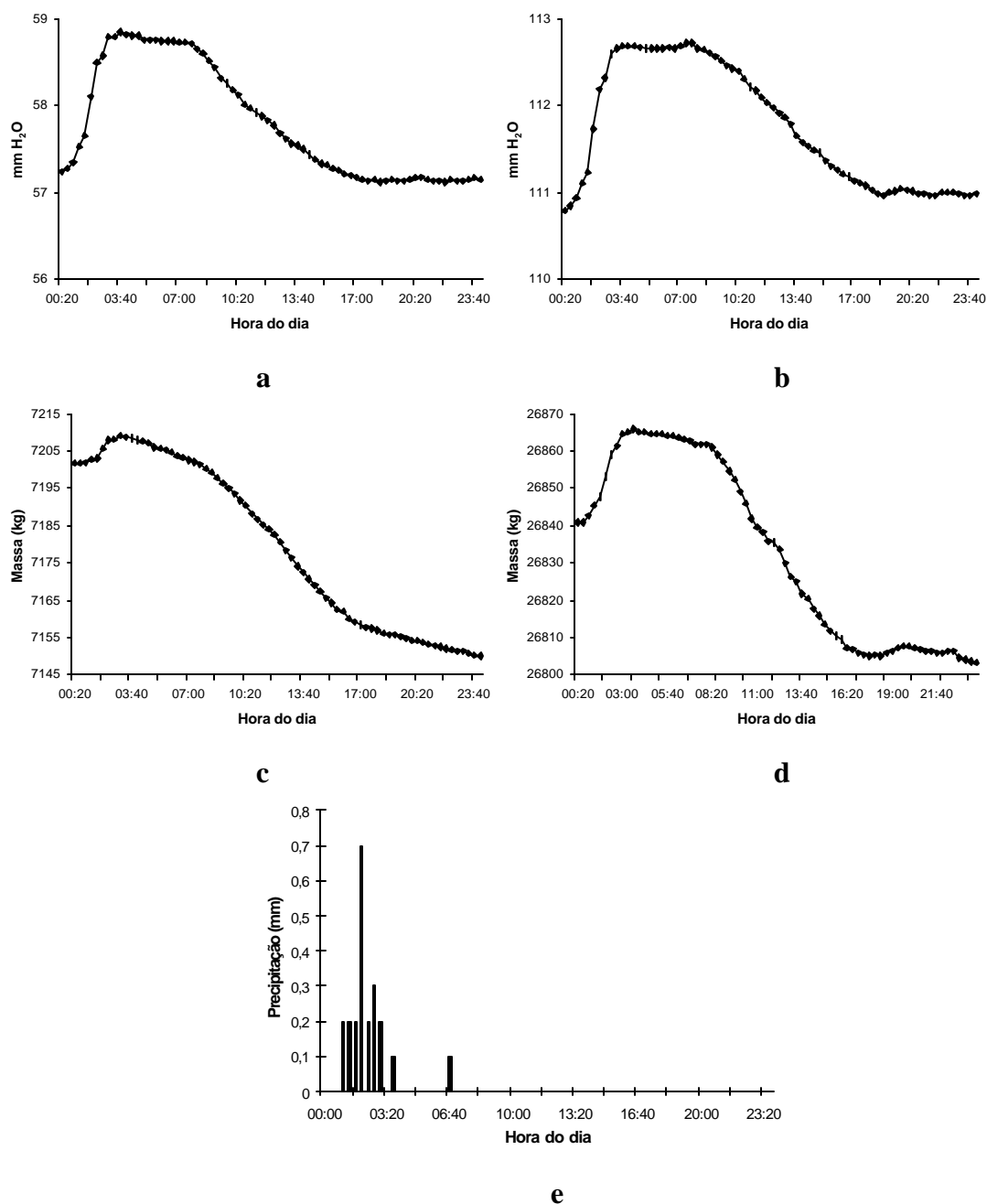


Figura 8 - Performance dos lisímetros 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d) em em dia com chuva no início da madrugada, e a precipitação ocorrida (e) durante o dia 293.

De um modo geral, dias chuvosos são fonte de erros de estimativa e determinação da evapotranspiração. No entanto, dependendo do horário do dia, da quantidade e intensidade da chuva, estes dados podem ser usados com êxito para cálculo

da evapotranspiração. Na Figura 8e observa-se a ocorrência de precipitação durante o dia 293. Nota-se que a variação positiva, ou seja, a entrada de água no sistema devido a precipitação ocorreu nas primeiras horas do dia, não sendo detectada mais nenhuma ocorrência durante o período. Neste caso, os valores de evapotranspiração diária não foram comprometidos, pois a precipitação ocorrida durante a madrugada não interferiu nos valores diários. Deste modo, a eliminação das diferenças positivas de massa no período da chuva, torna-se necessária.

Na Figura 9 são apresentados a performance dos lisímetros quando ocorreram de precipitações ao longo do dia. Em função da alta precipitação ocorrida nos dias anteriores, houve a necessidade de abertura dos drenos dos lisímetros que foram mantidos abertos em função da continuidade das chuvas. No dia 319, as variáveis mais importantes no balanço de massa do lisímetro (evapotranspiração, precipitação e drenagem) são visualizadas. Durante o período de luz deste dia, o decréscimo de massa ocorre em função da evapotranspiração e drenagem sendo de impossível separação dos mesmos. O que diferencia este dia específico do período anteriormente analisado (Figura 8) é que os valores de evapotranspiração é de difícil determinação durante um processo intermitente de precipitação (chuva-evapotranspiração-chuva). Em dias que ocorrem precipitações intermitentes, é aconselhável o descarte dos dados. Santiago (2001), trabalhando com dados de lisímetro de pesagem em dias chuvosos para determinação da evapotranspiração de referência também aconselhou o descarte dos dados face à difícil separação entre evapotranspiração e drenagem do sistema.

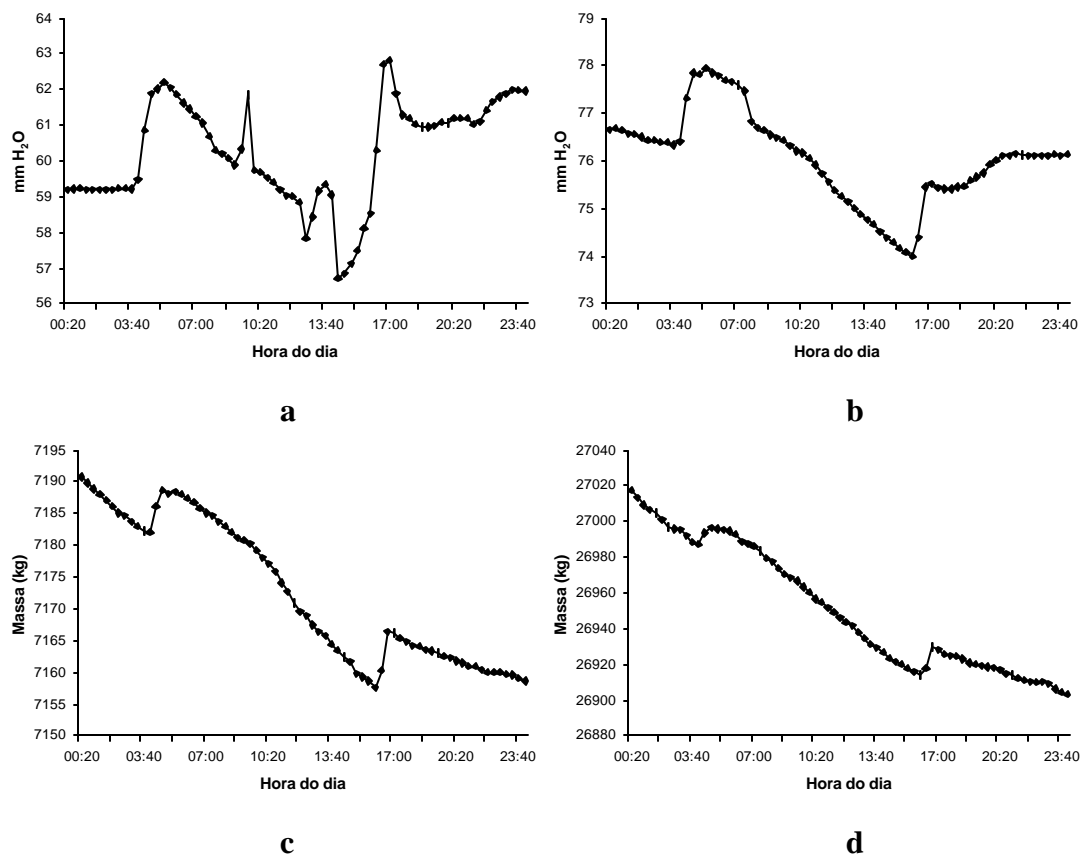
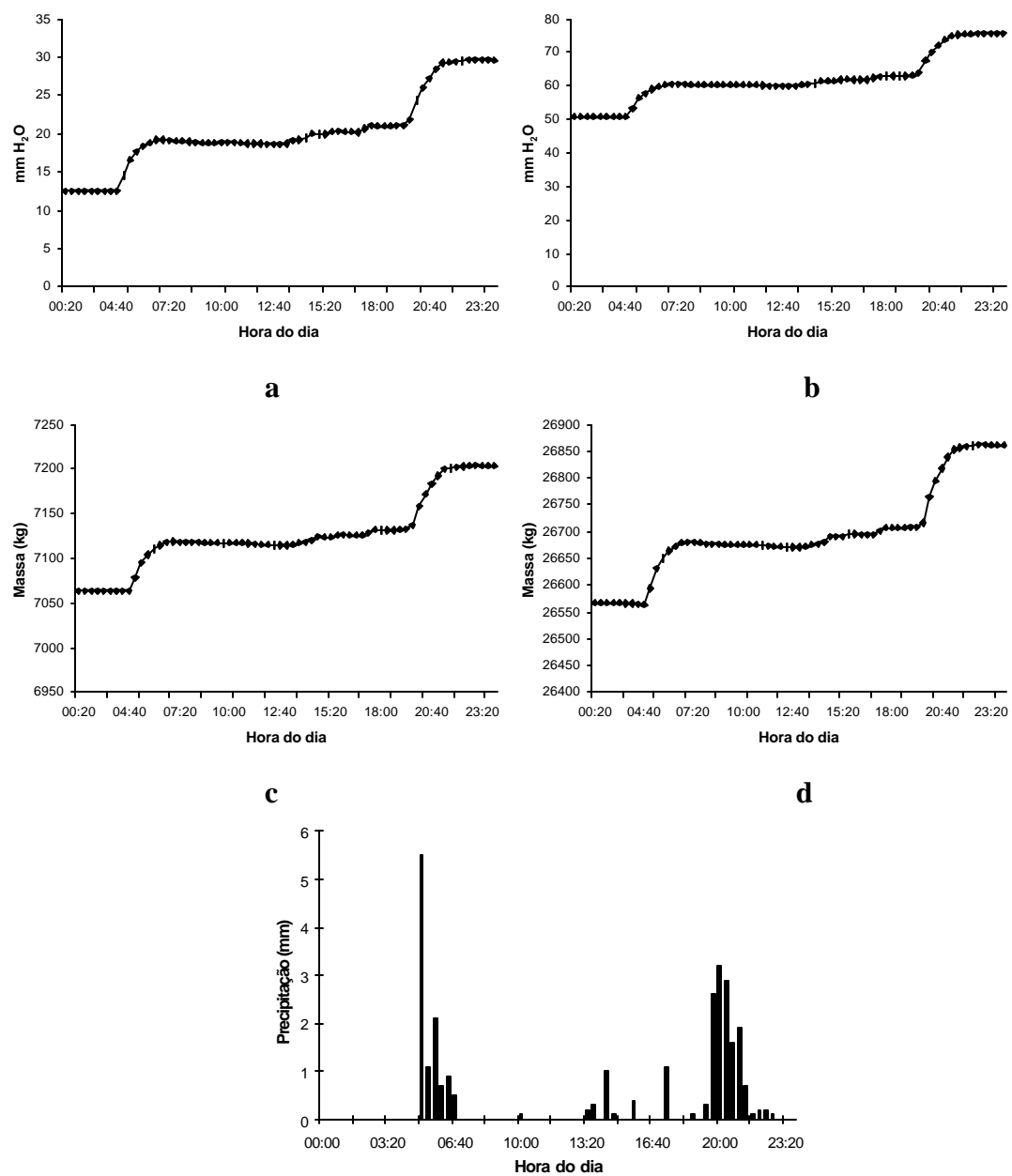


Figura 9 - Performance dos lisímetros 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d) em dia com ocorrência de chuva, drenagem e evapotranspiração. Dia 319.

Outra situação típica quando não se pode separar a evapotranspiração da precipitação, é observada na Figura 10, que apresenta a performance dos lisímetros no Dia Juliano 281. A precipitação ocorreu ao longo do dia, como pode ser observada na Figura 10e, refletindo um crescimento contínuo de variação da massa do sistema.



e
 Figura 10 - Performance dos lisímetros 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d) e a precipitação ocorrida (e) no dia 281.

3.4 Conclusões

Os lisímetros construídos apresentaram boa performance, detectando as variações de massa ao longo de um dia.

A metodologia de construção e montagem dos lisímetros de pesagem pode ser empregada para determinação da evapotranspiração.

Dias em que ocorrem precipitações intermitentes durante o período de radiação líquida positiva ($R_n > 0$) é aconselhável a sua eliminação.

4 CALIBRAÇÃO E ANÁLISE DO DESEMPENHO DE QUATRO LISÍMETROS DE PESAGEM BASEADOS EM CÉLULAS DE CARGA

Resumo

O objetivo deste trabalho foi de calibrar e analisar o desempenho de quatro lisímetros de pesagem com base em células de carga em campo para determinação da evapotranspiração, bem como quantificar os erros de medidas nos valores da evapotranspiração da lima ácida 'Tahiti' (*Citrus latifolia* Tan.). Os lisímetros estudados tem: com 0,8 metro de diâmetro e 0,6 metro de profundidade (lisímetro 1), 1,6 metro de diâmetro e 0,7 metro de profundidade (lisímetro 2), 2,7 metros de diâmetro e 0,8 metro de profundidade (lisímetro 3) e 4 metros de diâmetro e 1,3 metros de profundidade (lisímetro 4). A calibração foi feita utilizando sacos com brita com massa conhecida a fim de verificar a relação existente entre a saída de sinal das células de carga (mV) e a massa dos equipamentos. A linearidade desses equipamentos foi excelente, e baixa histerese, sendo encontrado um alto coeficiente de determinação ($r^2 = 0,99$). Os lisímetros tiveram sensibilidade suficiente para detecção de mudança de massa em geral menores que 0,04 mm, e valores de exatidão menores que 0,1 mm. Velocidade de vento introduz erros significativos determinação da evapotranspiração, principalmente quando se utiliza diferenças de valores de massa em intervalos de minutos, sendo preferível a utilização dos valores das diferenças diárias das massas.

Palavras-chave: lisímetro; calibração; evapotranspiração

CALIBRATION AND PERFORMANCE ANALYSIS OF FOUR LOAD CELL BASED WEIGHING LYSIMETERS

Summary

Crop evapotranspiration can be measured by using lysimeters. However, to obtain confiable measurements, the equipment must be adequately calibrated and tested. The objectives of this study were to calibrate and analyse the performance of four load cell based weighing lysimeters in the field, as well as to quantify the evapotranspiration measurement errors. The lysimeters studied were: (1) 0.8 m in diameter and 0.6 m deep (2) 1.6 m in diameter and 0.7 m deep, (3) 2,7 m in diameter and 0.8 m deep and (4) 4 m in diameter and 1.3 m deep. The calibration was performed using crushed stone bags with known mass, to verify the relationship between the load cell output voltage and the equipment mass. The response linearity and equipment hysteresis were excellent, showing a high coefficient of determination ($r^2 = 0.99$). The lysimeters sensitivities were adequate to detect a mass change generally smaller than 0.04 mm of water, and accuracy smaller than 0.1 mm. Wind introduces significant errors in the evapotranspiration measurement, mainly when mass difference values from time intervals of minutes are used, so the use of daily mass variations are recommended.

Key words: lysimeter; calibration; evapotranspiration.

4.1 Introdução

Desenvolvimento e montagem de lisímetros de pesagem com os mais variados tipos, tamanho e materiais tem sido reportados em estudos na área de manejo da irrigação, hidrologia e, principalmente, a micrometeorologia. Na literatura não se encontra referência a um lisímetro padrão, com tamanho, forma, diâmetro ou massa pré-estabelecida. Kohnke et al. (1940) já afirmavam naquela época que, independente da

forma ou material utilizado, a proposta do desenho do equipamento é baseada no grau do conhecimento das variáveis que envolvem uma determinada pesquisa. Anos mais tarde, Pruitt & Lourence (1985) fizeram uma análise crítica de lisímetros dos mais variados tamanhos e mecanismos de pesagem e apontaram a necessidade de avaliação minuciosa das culturas para representar alta qualidade dos dados de evapotranspiração, sendo que os erros deveriam ser conhecidos e quantificados, mesmo em lisímetros com grande precisão.

Um dos passos importantes antes do funcionamento de lisímetros de pesagem em campo é a calibração, que tem por finalidade estabelecer uma relação entre o sinal de saída da célula de carga (geralmente expresso em mV) e a massa do sistema. Outra finalidade da calibração é a verificação da linearidade e histerese da célula de carga. Lisímetros de pesagem devem ser preferencialmente calibrados *in situ*, nas mesmas condições climáticas do seu funcionamento, por adição e retirada de pesos previamente conhecidos. Howell et al. (1995) calibraram um lisímetro de 9 m² para determinação da evapotranspiração de referência com grama no Texas, USA. Meshkat et al. (1999) reportaram calibração de um lisímetro de pesagem utilizando um sistema de contrapeso acoplado a uma célula de carga de capacidade para 45 kg. Silva et al. (1996) descreveu os passos da calibração de um lisímetro de 0,92 m² de área para verificação da linearidade e histerese do equipamento em campo. Apesar dos tamanhos e massa diferentes dos lisímetros, todos esses autores encontraram um alto coeficiente de determinação (r^2), grande linearidade das células de carga e baixa histerese, evidenciando a necessidade de calibração desses dispositivos em campo.

A calibração e a coleta de dados em lisímetros de pesagem envolvem erros de medidas, que são usados para qualificar os dados em análise. Quatro tipos de erros de medidas são apontados na literatura (exatidão, precisão, sensibilidade e resolução), com definições confusas e muitas vezes usados incorretamente. Segundo Bloom (1992), acurácia ou exatidão é a quantidade que a medida difere a partir de um valor verdadeiro, estatisticamente pode-se dizer que é a dispersão dos valores medidos em torno da reta 1:1, que representa os valores reais. A precisão é a repetibilidade da medida, ou seja, o

grau de variabilidade de sucessivas medidas de um valor constante, pode-se dizer também que é a dispersão dos pontos em torno da média dos valores medidos. A sensibilidade é a menor variação de uma grandeza (massa, sinal elétrico etc) detectada que provoca uma mudança de leitura do sistema, e a resolução é a menor escala da divisão ou o último dígito que pode ser lido. A partir desses conceitos, percebe-se a distinção entre eles. Então, quando temos um erro sistemático, pode ocorrer que as medidas sejam precisas, mas não são necessariamente exatas. Em outra situação, instrumentos podem ser mais sensíveis ou terem maior resolução, mas alta sensibilidade ou resolução não significa obrigatoriamente grande exatidão.

Por outro lado, Allen et al. (1991) alertaram que de nada adiantava alta precisão, sensibilidade ou resolução em lisímetros de pesagem se eles forem inadequadamente manejados, pois medidas lisimétricas são medidas pontuais representativas de condições ambientais do próprio lisímetro. Extrapolações podem diferir da evapotranspiração real devido a uma série de fatores como a área vegetada circundante, entrada de calor sensível (efeito oásis), tamanho e espessura das paredes, profundidade do equipamento, entre outros. Esses autores ainda afirmaram que máquinas e precisão de sistemas nunca substituem a representatividade ambiental.

Este trabalho tem como objetivos a calibração em campo de quatro lisímetros de pesagem baseados em célula de carga, a quantificação dos erros de medidas e a interpretação dos valores de evapotranspiração.

4.2 Material e Métodos

4.2.1 Calibração

A calibração dos equipamentos foi realizada na área experimental do Departamento de Engenharia Rural da ESALQ/USP, em Piracicaba-SP. Foram utilizados quatro lisímetros de pesagem, cuja construção foi descrita no capítulo 1, sendo lisímetro 1 com 0,8 m de diâmetro e 0,6 m de profundidade, lisímetro 2 com 1,6 m de diâmetro 0,7 m de profundidade, lisímetro 3 com 2,7 m diâmetro e 0,8 de profundidade e o lisímetro 4 com

4 metros de diâmetro e 1,3 metros de profundidade. O sistema de pesagem é constituído por três células de carga para cada lisímetro com disposição triangular, formando um ângulo de 120° entre elas. Todas as células de carga utilizadas foram da marca Omega Engineering Inc.¹, modelo LCCA, de capacidade individual de 227 kg, 910 kg, 4.535 kg e 13.600 kg para os lisímetros 1, 2, 3 e 4, respectivamente. Segundo o fabricante, a acuracidade das células de carga é 0,037% do fundo de escala, ou 0,17, 0,17, 0,3, e 0,4 mm de equivalente de evapotranspiração por célula de carga, para os lisímetros 1, 2, 3 e 4, respectivamente.

No processo da calibração, utilizou-se um datalogger (CR23X Campbell Sci.) juntamente com um multiplexador de canais diferenciais (AM 416 Relay Multiplexer, Campbell Sci.) realizando leituras a cada três segundos, com média a cada minuto. As leituras foram armazenadas utilizando-se a instrução para este tipo de sensor (P6) do datalogger e a opção para alta resolução (P78) com “input range” de 10 mV (resolução de 0,33 µV). Para todas as células foram utilizadas 5000 mV como voltagem de excitação.

A calibração de todos os lisímetros foi executada seguindo basicamente o mesmo procedimento descrito a seguir. Procedeu-se a calibração em campo, e para evitar a mudança de massa do sistema devido à evaporação da água do solo, os lisímetros foram cobertos com uma lona plástica. Inicialmente, foi registrado a média da milivoltagem do sistema sem os sacos de brita, teoricamente descarregado. Em intervalos de 2 minutos foram acrescentados aos lisímetros sacos de brita nº 1 hermeticamente fechado, de diferentes massas e pesados em balança de acuracidade de 0,01g. O primeiro minuto da medida foi descartado para análise, já que inclui as oscilações provocadas pelo acréscimo e decréscimo do peso. Em seguida foram retirados os pesos em intervalos de 2 minutos na mesma sequência sua adição. Os pesos utilizados em cada lisímetro assim como o valor máximo de peso acrescentado em cada um deles variou buscando obter um “range” de 160, 145, 42 e 20 mm de equivalente de água, para os lisímetros 1,

¹ A divulgação da empresa fabricante é apenas para orientação do leitor, e não para divulgação comercial

2, 3 e 4, respectivamente. Desta maneira, foi feita uma relação linear entre o somatório das saídas de sinal das três células de carga e a massa adicionada, em equivalente de milímetros de água (mv x mm).

O lisímetro 1 utiliza três células de carga modelo LCCA 500 (capacidade total de 680 kg). Na calibração foram utilizados 20 sacos de 3,518 kg e 10 sacos de 1,005 kg representando 7 e 2 mm, cada um, respectivamente. O total de peso acrescentado correspondeu a 80,42 kg ou 160 mm de equivalente de água. Desta forma foram obtidos 60 pares de pontos para confecção da curva de calibração (mm X mV), sendo avaliada a linearidade e acurácia

O lisímetro 2 utiliza três células de carga modelo LCCA 2K (capacidade total de 2.722 kg). Para calibração foram utilizados 30 sacos de brita, sendo que 20 sacos de 15,07 Kg e 10 sacos de 1,005 kg, correspondendo a 7 e 0,5 mm, cada um deles, respectivamente. O total de peso acrescentado foi de 290,15 kg, ou 145 milímetros de equivalente de água. Desta maneira, 60 pares de pontos para confecção da curva de calibração (mm X mV) foram usados para confecção da curva de calibração.

O lisímetro 3 utiliza três células de carga modelo LCCA 10K (capacidade total de 13.600 kg). Foram utilizados 80 sacos de brita, com 3 kg de massa cada saco. Em seguida foram adicionados 20 baterias de 4 sacos, totalizando 12 kg cada bateria, correspondendo a 2,1 mm por bateria. O total de peso acrescentado foi de 240 kg, ou 42 mm de equivalente de água. Desse modo, foi obtido 40 pares de pontos para confecção da curva de calibração do sistema.

O lisímetro 4 utiliza três células de carga modelo LCCA 30K (capacidade total de 40.800 kg). A calibração desse lisímetro foi semelhante ao lisímetro 3, com a utilização de 80 sacos de 3 kg cada, dividido em 20 baterias de 12 kg, com o total de 240 kg ou 19,1 mm de equivalente de água. Foram obtido 40 pares de pontos para confecção da curva de calibração do sistema.

4.2.2 Análise do desempenho

A exatidão dos equipamentos foi determinada por meio do erro padrão, que foi a dispersão dos valores de massa mensurados pelos lisímetros em relação aos valores das massas padrões (sacos de brita). A precisão foi determinada por meio do coeficiente de determinação (r^2) obtida pela regressão linear de cada equipamento. A resolução é inerente ao conjunto célula de carga-multiplexador-datalogger e a sensibilidade foi obtida pela observação dos mínimos valores de mudança de massa do equipamento em espaços de 20 minutos. Segundo o fabricante, a instrução de leitura das células de carga (P6) com “input range” de 10 mV, tem uma resolução de 0,33 μV , ou 0,00033 V. A sensibilidade dos equipamentos é obtidas pelo produto da resolução do datalogger com o multiplicador de cada célula (kg mV^{-1}). McFarland et al. (1983) e Fischer & Allen (1991) utilizaram a seguinte fórmula para o cálculo do multiplicador:

$$M = \frac{CT}{SN.E} \quad (1)$$

em que;

M – Multiplicador da célula, (kg mV^{-1})

CT – Capacidade total de cada célula, (kg)

SN – Saída nominal de cada célula (mV V^{-1})

E – Voltagem de excitação (V)

Para determinação da evapotranspiração da lima ácida na fase inicial de desenvolvimento, o intervalo das leituras ocorreu a cada 3 segundos, com média a cada 20 minutos. Foram armazenados os dados de saída de cada uma das células de carga (mV) e o valor total foi calculado em planilha eletrônica. A variação negativa de massa dos lisímetros em um determinado espaço de tempo corresponde a quantidade de água perdida para a atmosfera naquele período, como mostra a relação:

$$ETc = \frac{M_i - M_{i-1}}{A \cdot \Delta T} \quad (2)$$

em que;

ETc - Evapotranspiração da cultura, (mm período⁻¹)

M_i - Massa atual do lisímetro

M_{i-1} - Massa do lisímetro no tempo anterior

A – Área do lisímetro

ΔT – Período de tempo

Pela relação acima, é de se esperar que em um dia normal (ausência de precipitação ou irrigação) ocorram valores negativos de variação de massa, pois valores atuais são sempre menores que os valores de massa da ocorrência anterior. Para o melhor entendimento do processo, convencionou-se os valores negativos como a saída de água por evapotranspiração ou drenagem e valores positivos como a entrada de água por irrigação ou precipitação.

Na análise de dados obtidos com o uso de lisímetro, foram consideradas três formas distintas para o cálculo dos valores de evapotranspiração diária. O primeiro consistiu do somatório das diferenças de massa do equipamento ao longo de um dia completo, ou seja:

$$ETc_1 = \frac{\sum_{i=1}^{72} (M_i - M_{i-1})}{A \cdot \Delta T}, \text{ quando } (M_i - M_{i-1}) < 0 \quad (3)$$

em que;

ETc₁ - Evapotranspiração da cultura, mm dia⁻¹

M_i – M_{i-1} - Diferença negativa entre a massa atual e a massa no tempo i-1.

i - período de medida (20 minutos)

A segunda forma foi o somatório de todas as diferenças de massa calculadas em cada intervalo de integração ao longo de um dia, descontando apenas os valores de

precipitações (quando esta ocorria em períodos noturnos ou em curtos períodos de tempo) e irrigações.

$$ETc_2 = \frac{\sum_{i=1}^{72} (M_i - M_{i-1})}{A \cdot \Delta T} \quad (4)$$

A terceira forma foi a adotada por Allen & Fischer (1991), que foi a diferença de massa da meia noite de um dia até a meia noite do dia posterior, sem considerar as oscilações a cada intervalo de integração, descontando também valores de precipitações e irrigações.

$$ETc_3 = (M_{24:00 \text{ dia atual}} - M_{24:00 \text{ dia anterior}})/A \cdot \Delta T \quad (4)$$

4.3 Resultados e Discussão

Na Figura 1 estão plotados os valores de saída das células de carga, em milivoltagem (mV) por volt de excitação e o equivalente em milímetros de água para o lisímetro 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d). Verifica-se que o modelo linear descreveu adequadamente a relação, tendo em vista o alto coeficiente de determinação (r^2) de 0,99 de todos os equipamentos. Percebe-se que a linearidade foi excelente e mínima histerese. Resultados semelhantes foram encontrados por Schneider et al. (1998), Howell et al. (1995) e Allen & Fischer (1991), utilizando metodologia semelhante na calibração.

É importante salientar que todas as calibrações utilizadas neste estudo foram realizadas com velocidade média do vento (média de um minuto) menores que $1,0 \text{ m s}^{-1}$. Quando se tentou realizar calibrações no período da tarde, período em que ocorrem as maiores velocidades de vento, foi observado uma alta histerese, devido à turbulência provocada no sistema. Velocidade do vento superior a $1,5 \text{ m s}^{-1}$ deve ser

preferencialmente evitada, pois foram frustradas as tentativas quando se realizou calibrações nos equipamentos com esse valor.

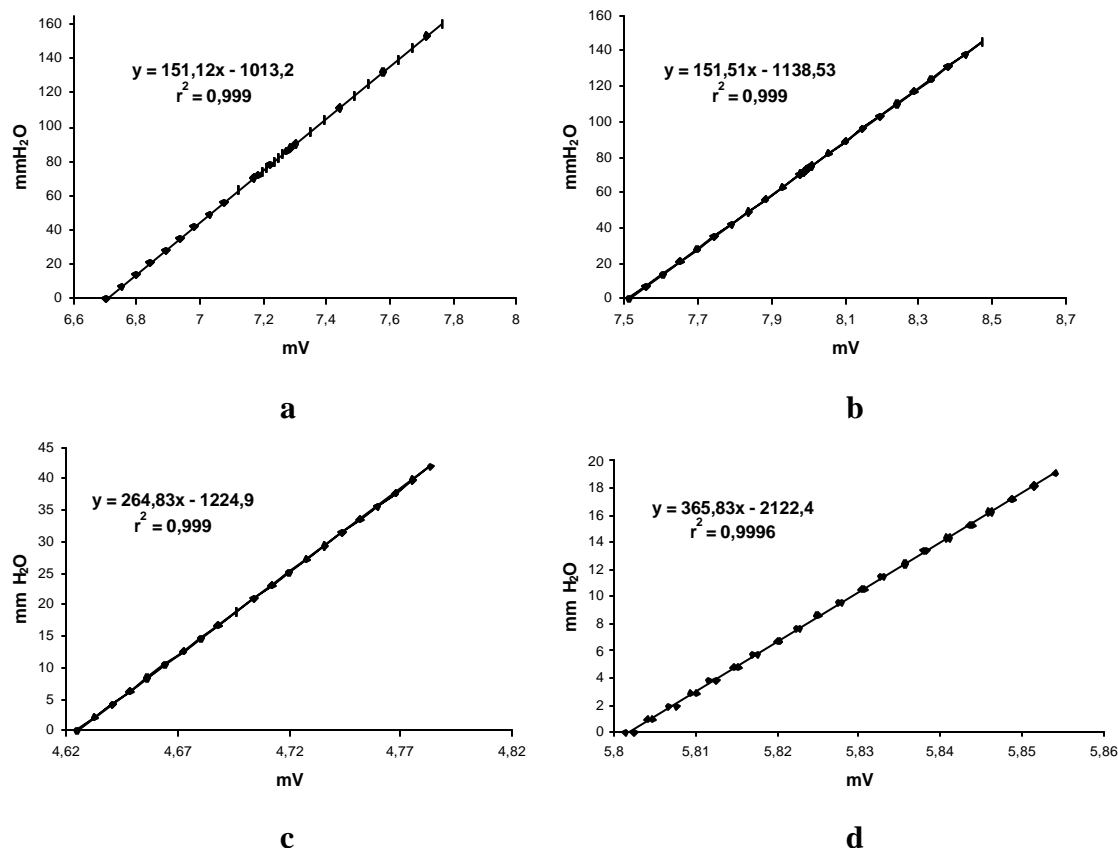


Figura 1 - Resultados de calibração para o lisímetro 1 (a), 2 (b), 3(c) e 4 (d).

A Figura 2 mostra os erros entre os pesos medidos pelos lisímetro e os pesos padrões adicionados e retirados durante a calibração. Para o lisímetros 1 e 2, a exatidão do sistema foi de 0,038 e 0,067 mm, e para os lisímetros 3 e 4, foram encontrados valores de 0,045 e 0,1 mm, respectivamente. Esse valores foram muito próximos aos encontrados por Schneider et al. (1998), trabalhando com metodologia semelhante, que encontraram valores variando de 0,02 a 0,1 mm.

Com relação à sensibilidade do sistema, foram determinados os multiplicadores das células de carga para todos os equipamentos, resultando em $15,2 \text{ kg mV}^{-1}$ para o lisímetro 1, $60,48 \text{ kg mV}^{-1}$ para o lisímetro 2, $302,4 \text{ kg mV}^{-1}$ para o lisímetro 3 e 907 kg mV^{-1} para o lisímetro 4.

mV^{-1} para o lisímetro 4. Como a resolução do datalogger é de $0,33 \mu\text{V}$ com 10 mV “input range”, ($0,00033 \text{ mV}$), esse equipamento tem sensibilidade suficiente para detectar variações de massa de $0,005 \text{ kg}$ no lisímetro 1, $0,02 \text{ kg}$ no lisímetro 2, $0,1 \text{ kg}$ no lisímetro 3 e $0,3 \text{ kg}$ no lisímetro 4, correspondendo a $0,01$; $0,01$; $0,017$ e $0,23 \text{ mm}$, respectivamente. Na prática, foram observados valores de sensibilidade de $0,0075 \text{ kg}$ no lisímetro 1, $0,03 \text{ kg}$ no lisímetro 2, $0,151 \text{ kg}$ no lisímetro 3 e $0,454 \text{ kg}$ no lisímetro 4, correspondendo a $0,015$; $0,015$; $0,026$ e $0,036 \text{ mm}$, respectivamente. Esses valores foram, em média, 50% maiores que a máxima sensibilidade do datalogger. Essa diferença se deve à combinação datalogger-multiplexador, que limitou a resolução do sistema. Allen & Fischer (1990), trabalhando com configuração semelhante, também atribuíram à combinação desses dois equipamentos à limitada resolução e precisão nas medidas de evapotranspiração.

Os resultados referente a exatidão (erro padrão) e sensibilidade para os quatro lisímetros calibrados demonstraram que a sensibilidade é maior que a exatidão. Bloom (1992) afirmou que um sistema com alta sensibilidade ou resolução não se traduz necessariamente em alta exatidão.

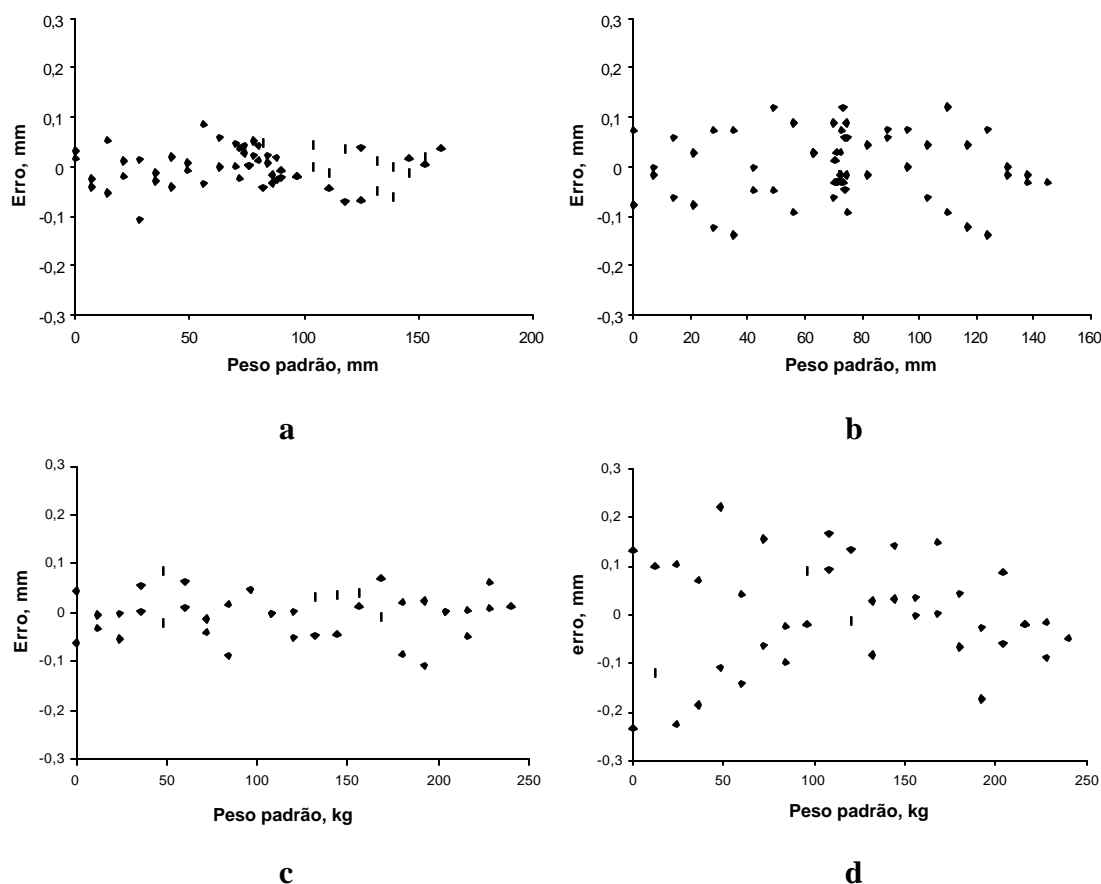


Figura 2 - Erro entre o peso medido pelos lisímetros 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d) e o peso padrão durante a calibração.

Na Figura 3 estão plotados os valores diários de evapotranspiração utilizando as três metodologias de cálculo (ETc_1 , ETc_2 e ETc_3). A diferença de massa entre a meia noite do dia atual e do dia anterior (ETc_3) foi considerado como padrão. Nota-se, de maneira geral, que houve superestimativa dos valores de evapotranspiração quando foi considerado o somatório das diferenças negativas, com 17% no lisímetro 1. A grande diferença dos valores diários de evapotranspiração para este lisímetro pode ser atribuída ao espaçamento das paredes (interna e externa) do lisímetro, que foi de 0,05 metros, representando 26,6% da área evaporante. Além desse ser o mais sensível dos lisímetros, o grande espaço entre as paredes e arquitetura da planta (lima ácida) aumentou a turbulência interna do sistema devido a ação do vento, em função deste possui menor massa. Segundo Allen et al. (1991) o efeito do espaçamento das paredes pode

superestimar os valores de evapotranspiração em até 21%. Para os demais lisímetros, houve uma superestimativa dos valores entre 7 e 8%. A diferença entre a área interna e a externa representou uma percentagem de 12,9; 10,6 e 7,1% para os lisímetros 2, 3 e 4, respectivamente. Diferenças diárias foram maiores quando comparados com o método padrão, principalmente em dias em que ocorreram precipitações ou dias em que a velocidade do vento contribuiu para uma turbulência acentuada no sistema.

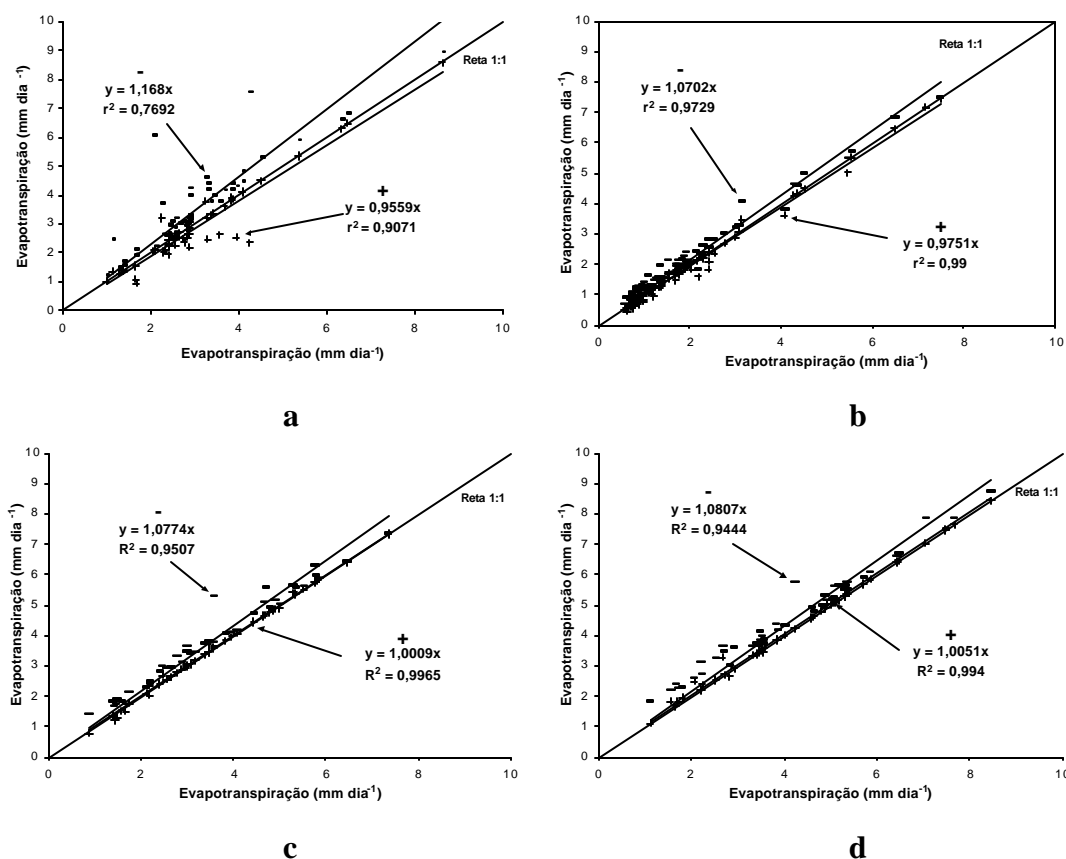


Figura 3 - Valores de evapotranspiração medidos nos lisímetros 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d) com a somatória das diferenças negativas das massas (ET_{c1} , -) e a somatória das diferenças das massas (ET_{c2} , +), quando comparado com valores das diferenças das massa inicial e final.

Com relação ao método da somatória das diferenças das massa nos intervalos de 20 minutos, observou-se que de maneira geral esta metodologia adequou-se bem ao método padrão, com uma ligeira subestimativa de 5 e 3% para os lisímetros 1 e 2. Para

os demais, houve uma total concordância entre os valores lidos, sugerindo que esta metodologia pode ser usada para a determinação diária dos valores de evapotranspiração, desde que descontadas as diferenças das massas quando ocorrem eventos de irrigações ou precipitações.

Nas Figuras 4 e 5 são apresentados os decréscimos da variação da massa dos lisímetros 2 e 1 ao longo de um dia completo e a velocidade do vento coletados em intervalos de 20 minutos. Observa-se na Figura 4 que o dia 353 foi um dia sem ocorrência de chuvas ou irrigações. A velocidade média do vento neste dia foi de $0,6 \text{ m s}^{-1}$, com um pico médio de $1,4 \text{ m s}^{-1}$ às 15:00 h. O decréscimo de massa ocorreu de forma gradual nas horas de maior demanda evapotranspirativa (períodos de radiação líquida positiva). A turbulência causada pelo vento foi mínima, e a aplicação das três metodologias aqui apresentadas para determinação diária da evapotranspiração poderiam ser usadas, sem comprometimento dos resultados, com diferença de $0,01 \text{ mm}$ entre ET_{C_1} e ET_{C_3} .

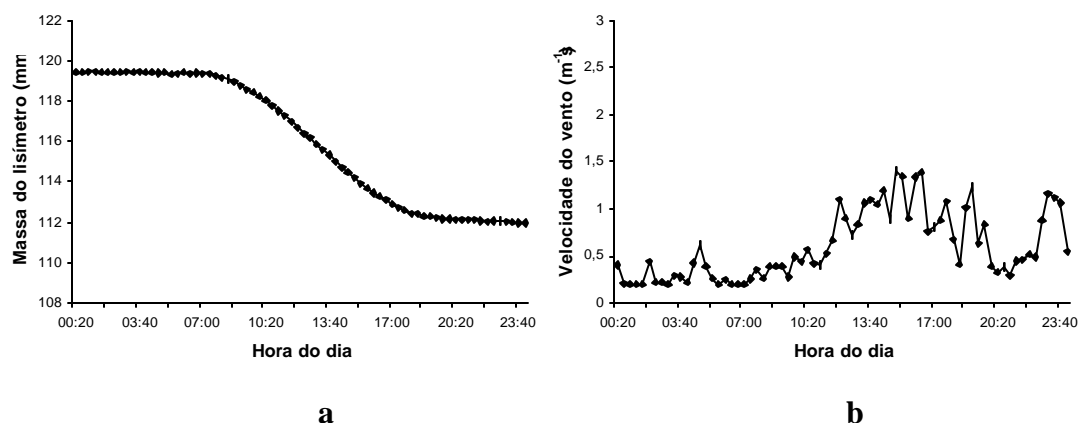


Figura 4 - Variação de massa do lisímetro de 1,6 metro de diâmetro (a) e velocidade do vento (b) no dia 353.

No dia 336 (Figura 5), verificou-se uma a velocidade média do vento de $1,1 \text{ m s}^{-1}$, com um pico médio de $2,9 \text{ m s}^{-1}$ às 21:00 h. Nota-se que o decréscimo da massa ocorreu de forma irregular, ou seja, ocorreram oscilações nas horas de maior demanda

evapotranspirativa mesmo com ausência de precipitação. A evapotranspiração ocorrida neste dia foi de 2,9 mm pelo método padrão e 4,25 mm pelo método do somatório das diferenças negativas das massas. O inconveniente da utilização desse último método em dias de ventos inconstantes é que com a turbulência provocado por essa variável há um ganho de massa no sistema, logo depois perdido para estabilização. É justamente essa perda momentânea de massa que é computada erroneamente como evapotranspiração. Esse fenômeno não ocorre no método do somatório das diferenças das massas, pois o ganho de massa provocado pela turbulência dos ventos é anulada durante o processo de estabilização do sistema. Foi verificado o mesmo valor de evapotranspiração por este método quando comparado ao padrão.

Segundo Howell et al. (1995), que analisaram o efeito do vento no desempenho de um lisímetro de pesagem, a recomendação para diminuir o efeito causado pela ação do vento nos valores de evapotranspiração seria o uso de um período maior de integração das médias. Segundo esses autores, essa medida causaria um amaciamento dos valores de massa, resultando em sensível melhora dos dados. Fenômeno semelhante foi observado por Wright, (1991) que detectaram diferenças de até 0,66 mm devido à ação dos ventos sobre lisímetros de pesagem.

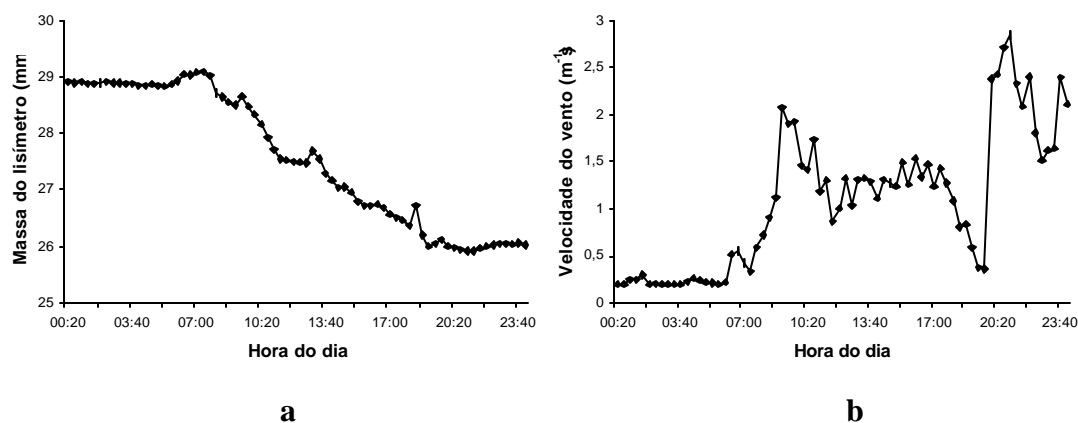


Figura 5 - Variação de massa do lisímetro 1 (a) e velocidade do vento (b) no dia 336.

4 Conclusões

A partir dos dados obtidos, pode-se concluir que a metodologia empregada na calibração dos lisímetros foi adequada, obtendo-se um coeficiente de determinação (r^2) de 0,99 na equação de calibração, com isso o equipamento pode ser utilizado com êxito em estudos de evapotranspiração.

Foram encontrada sensibilidade de 0,015; 0,015; 0,026 e 0,036 mm e exatidão de 0,038; 0,067; 0,045 e 0,1 mm para os lisímetros 1, 2, 3 e 4, respectivamente.

A metodologia para determinação da evapotranspiração utilizando o somatório das diferenças negativas ao longo do dia (ET_{c1}) superestima os valores de evapotranspiração em 17; 7; 7 e 8 % para os lisímetros 1, 2, 3 e 4, respectivamente, quando comparados com a determinação da evapotranspiração pela diferença de massa no final do dia (ET_{c3}), principalmente em dias em que ocorreram precipitações ou dias de vento fortes.

A metodologia para determinação da evapotranspiração utilizando o somatório das diferenças das massas pode ser utilizada, desde que descontados valores de precipitação e/ou irrigação.

O equipamento que utilizou a maior percentagem de área entre as paredes interna e externa (lisímetro 1) representou um maior superestimativa da somatória dos valores das diferenças negativas em comparação com a determinação da evapotranspiração pelo método padrão em função da maior oscilação provocada pelo vento.

5 EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA LIMA ÁCIDA ‘TAHITI’ (*Citrus latifolia* Tan.) COM O USO DE LISÍMETROS DE PESAGEM

Resumo

O objetivo deste trabalho foi a determinação da evapotranspiração da lima ácida ‘Tahiti’ (*Citrus latifolia* Tan.) e o coeficiente de cultivo (Kc) na fase inicial de implantação de um pomar, por meio de lisímetro de pesagem. O experimento foi realizado na Fazenda Areão ESALQ/USP, em Piracicaba, SP (22° 42’30’’ S e 47° 30’W), de Agosto a Dezembro de 2001, em um pomar de lima ácida ‘Tahit’ de 1 ha no espaçamento de 7 X 4 m com irrigação por gotejamento. Foram utilizados dois lisímetros de pesagem, sendo o primeiro com 0,8 m de diâmetro e 0,6 m de profundidade (lisímetro 1) e o segundo com 1,6 m de diâmetro e 0,7 m de profundidade (lisímetro 2). A evapotranspiração de referência foi estimada pelo modelo de Penman-Monteith FAO-56. A evapotranspiração média variou de 3,07 a 3,77 e 1,24 a 3,52 mm no período de Agosto a Dezembro, para os lisímetros 1 e 2, respectivamente. A variação dos valores de Kc foram de 0,131 a 0,049 para o lisímetro 1 e 0,0215 a 0,0531 para o lisímetro 2. Foi notado valores superiores de evapotranspiração medida no lisímetro menor com relação ao maior em função da área efetiva dos lisímetros. A evapotranspiração dos lisímetros aumentaram no período úmido em função do aumento da evaporação do solo.

Palavras chave: Evapotranspiração, lima ácida

EVAPOTRANSPIRATION OF “TAHITI” LIME (*Citrus latifolia* T.) DETERMINED USING WEIGHING LYSIMETERS

Summary

This study had the objectives of determining the evapotranspiration of young “Tahiti” lime trees (*Citrus latifolia* T.) using weighing lysimeters, and calculation the crop coefficient (Kc). The experiment was carried out at Fazenda Areão - ESALQ/USP, in Piracicaba - SP, from August to December 2001. A lime orchard was planted in a site of 1 ha, spaced at 7 x 4 m, using a dripping irrigation system. The study was done using two weighing lysimeters: the first one was 0.8 m in diameter and 0.6 m deep (lysimeter 1), and the second one was 1.6 m in diameter and 0.7 m deep (lysimeter 2). Reference evapotranspiration was estimated using the Penman-Monteith FAO-56 method. Average evapotranspiration was 1.24 and 3.52 in August, and 3.07 and 3.77 in December, for the lysimeters with 2 and 1, respectively. Calculated Kc values varied from 0.0215 to 0.0531 for the lysimeter 2, and from 1.131 to 0.049 for the lysimeter 2. Evapotranspiration measured at the smaller lysimeter was higher than at the larger one due to border effect. During the wet periods, the evapotranspiration was relatively higher due to soil evaporation.

Key-words: evapotranspiration; lime; lysimeters.

5.1 Introdução

O Brasil se apresenta como um dos maiores produtores mundiais de limão. Apesar disto, a citricultura brasileira ainda explora metade do seu potencial. Prova disto é que no ano de 1997, o país importou 26 mil toneladas (US\$ 22,7 milhões) da fruta enquanto as exportações limitaram-se a um volume em torno de 1,5 mil toneladas (US\$ 750 mil) (Agriannual 1998).

A variabilidade natural de ocorrências de chuvas tem levado fruticultores a considerar a irrigação uma tecnologia indispensável aos sistemas de produção. A irrigação de culturas cítricas no Estado de São Paulo, apesar de crescente, não é prática rotineira. A adoção da irrigação se impõe caso se queira aumentar a produção e a qualidade dos frutos, resultando em maior competitividade no mercado. Um dos grandes problemas, no entanto, encontra-se na dificuldade em estabelecer um manejo adequado no controle da água aplicada via irrigação.

São escassos os conhecimentos sobre a necessidade hídrica da cultura do limão, principalmente nos estádios iniciais do seu desenvolvimento. O emprego de lisímetros, de pesagem vem a ser um método direto da determinação da evapotranspiração da cultura, estabelecendo relações direta entre a perda de água pela cultura e as variáveis climáticas envolvidas no processo.

Para Allen et al.(1998), a evapotranspiração da cultura (E_{Tc}) é determinada pela aproximação do coeficiente de cultivo (K_c) considerando que os efeitos das várias condições climáticas são incorporados à E_{To} . Segundos esses mesmos autores, o efeito da transpiração da cultura e evaporação do solo, é integrado em um único coeficiente de cultivo, calculado empiricamente a partir de dados lisimétricos.

Doorenbos & Kassam (1979) sugerem inúmeros valores de K_c para diversas culturas sob variadas condições climáticas. Porém nem sempre o uso desses coeficientes empíricos retrata a verdadeira condição de perda de água de uma cultura, pois os valores de K_c utilizados são médias obtidas em diversas localidades do mundo. Allen et al. (1998) sugere que a determinação do coeficiente de cultivo seja específico para uma dada localidade, tipo de cultura e estágio de desenvolvimento.

O objetivo do presente trabalho foi determinar a evapotranspiração da lima ácida 'Tahiti' (*Citrus latifolia* T.) utilizando lisímetro de pesagem baseado em célula de carga, durante o estágio inicial de desenvolvimento, bem como a determinação do coeficiente de cultivo (K_c).

5.2 Materiais e Métodos

O experimento foi realizado na área experimental do Departamento de Engenharia Rural, na Fazenda Areão, da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” ESALQ-USP, situada no município de Piracicaba-SP, nas seguintes coordenadas geográficas: 22° 42’ de latitude Sul; 47° 30’ de longitude Oeste e aproximadamente 546 metros de altitude. Piracicaba possui clima do tipo Cwa no sistema Koppen, denominado subtropical úmido, e caracterizado por estiagem no inverno, temperatura média no mês mais frio de 18°C e 22°C no mês mais quente. A temperatura média anual é de 21,4°C, e total anual de chuva é de 1.257 mm (Sentelhas & Pereira, 2000).

O solo da área experimental é classificado como Terra Roxa Estruturada, série alfisol. Para análise granulométrica e fertilidade foram coletadas 15 amostras deformadas de solo até a profundidade de 0,6 m, seguindo recomendações do laboratório de solos da ESALQ, formando uma única amostra composta. Os resultados obtidos na análise de fertilidade do solo indicaram ligeira acidez, com pH variando de 4,4 a 4,8 na profundidade de 0 a 0,6 m. Seguindo as recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo, aplicou-se 6.500 kg de calcário dolomítico parcelado em duas doses. A primeira dose foi de 3.500 kg (Abril 2000) seguida de uma passagem do arado de aiveca para incorporação vertical do calcário. Logo depois foi passada uma grade pesada para promover destorroamento do terreno. A segunda dose foi de 3.000 kg (Junho 2000) seguida de uma passagem de grade leve para maior pulverização e nivelamento do solo.

A adubação da área foi feita em sulco, sendo aplicado à lanço 0,25 kg de calcário dolomítico juntamente com 0,06 kg de P₂O₅ (aproximadamente 0,35 kg de superfosfato simples) por metro linear de sulco. A fonte de adubação nitrogenada foi inicialmente a uréia, sendo posteriormente substituída pelo nitrato de cálcio (0,08 kg planta⁻¹ ano⁻¹).

A cultura de lima ácida ‘Tahiti’ foi implantada na primeira quinzena de Junho de 2001 em uma parcela experimental de aproximadamente 1,0 há. As mudas são da variedade IAC 5 enxertadas em citrumelo ‘Swingle’, transplantadas com 4 meses de idade, no espaçamento de 7 m X 4 m, totalizando 360 plantas ha⁻¹. A escolha do porta enxerto foi devida a sua tolerância à gomose, doença com alta incidência em pomar próximo. O plantio foi realizado em sulcos e não mais em covas, por recomendação do Departamento de Solos da ESALQ. O sistema de irrigação utilizado no pomar é por gotejamento, com emissores autocompensável, com vazão de 4 L h⁻¹ (Modelo PCJ, Netafim). Com quatro emissores por planta a vazão total do sistema foi 5.760 L h⁻¹. A aplicação de nitrogênio foi feita via fertirrigação com auxílio de injetor de fertilizantes tipo "venturi".

Para determinação da evapotranspiração da cultura foram utilizados 4 lisímetros de pesagem com diferentes diâmetros e profundidade, sendo o primeiro de 0,8 m de diâmetro e 0,6 m de profundidade (lisímetro 1), o segundo com 1,6 m de diâmetro e 0,7 m de profundidade (lisímetro 2), o terceiro com 2,7 m de diâmetro e 0,8 m de profundidade (lisímetro 3) e o quarto com 4 m de diâmetro e 1,3 m de profundidade (lisímetro 4) (Capítulo 1 e 2). Os lisímetros apresentaram sensibilidade para detecção de massa de 0,0075; 0,03; 0,151 e 0,454 kg para os lisímetros 1, 2, 3 e 4, respectivamente, como descrito no capítulo anterior. A finalidade da implantação de quatro lisímetros de tamanhos diferentes foi determinar a evapotranspiração nos diversos estádios de desenvolvimento da cultura. No presente estudo, utilizou-se apenas os resultados referentes aos lisímetros 1 e 2, que possuíam sensibilidade suficiente para registrar as pequenas taxas de ET na fase inicial da cultura, principalmente nos meses secos.

Foram feitas medidas periódicas da transpiração nos lisímetros 1 e 2. Para tanto, os lisímetros foram cobertos com uma lona plástica a fim de evitar a evaporação da água pelo solo, sendo que a contribuição para variação de massa do sistema foi exclusivamente à transpiração das plantas.

Todos os equipamentos estavam providos de três células de carga sob a caçamba metálica interna, com disposição triangular e formando um ângulo de 120° entre elas. O modelo das células utilizadas foi LCCA da Ômega Engineering Inc. Segundo o fabricante, estas células têm acuracidade de 0,037% de fundo de escala. Para coleta de dados, foi utilizado um sistema automático de armazenamento (CR23X, Campbell Sci Inc.) juntamente com um multiplexador de canais diferenciais (AMP 416, Campbell Sci). O datalogger registrava leituras a cada 3 segundos com média a cada 20 min.

Para estimativa da evapotranspiração de referência diária (ET_o), foi utilizado a equação de Penman-Monteith FAO-56 parametrizada por Allen et al. (1998). As variáveis meteorológicas foram obtidas da estação agrometeorológica do Departamento de Engenharia Rural distante 70 metros dos lisímetros, com sensores de radiação líquida, temperatura e umidade relativa do ar, velocidade do vento e placa de fluxo de calor do solo. Todos os sensores foram ligados a um datalogger (CR10, Campbell Sci. Inc.) com leitura a cada segundo e média a cada 20 minutos.

Como os lisímetros apresentam tamanhos diferentes, a contribuição da evaporação também difere, sendo que os valores tendem a ser relativamente maiores com a diminuição da área dos lisímetros. Para efeito de irrigação localizada, os valores de ET_c dos lisímetros podem ser utilizados sofrendo uma correção referente a área efetiva dos lisímetros (A_L). Os lisímetros 1 e 2 utilizados para determinação de K_c possuem áreas efetiva de 0,52 e 201 m², respectivamente. Entretanto a área útil da cultura é de 28 m² (A_C), então o K_c foi ajustado segundo a metodologia descrita por Phene et al. (1991).

$$K_c = \frac{ET_{c(lisímetro)}}{ET_o} \cdot \frac{A_L}{A_C}$$

Segundo os autores a metodologia pode ser utilizada de maneira confiável desde que o solo da área esteja seco, pois a contribuição do solo externo não está sendo determinada. Porém, para efeito de irrigação localizada, na qual a utilização do K_r é

necessária para transformar a ET_c em lâmina de irrigação, a metodologia utilizada é plenamente aceitável. É importante ressaltar que os valores de K_c calculados neste trabalho correspondem a um espaçamento da cultura de 7×4 m ou 28 m^2 , sendo necessária a correção destes valores para outros espaçamentos.

5.3 Resultados e Discussão

Na Figura 1 estão plotados os resultados dos valores diários das precipitações ocorridas no período da avaliação. Na Figura 2 estão plotados os valores diários de evapotranspiração determinadas nos lisímetros 1, 2, 3 e 4 para os dias Julianos de 331 a 355.

Observa-se que os valores de ET nos lisímetros maiores (3 e 4 m) são semelhantes ao longo deste período, e de valores próximos à evapotranspiração de referência calculada. Estes resultados estão de acordo com Guiting (1991) que trabalhou com lisímetros de diversos diâmetros, concluindo que a partir de 6 m^2 de área evaporante, a evapotranspiração assumia valores de evapotranspiração da cultura. Com relação aos lisímetros 1 e 2, os valores de evapotranspiração foram menores em relação aos lisímetros 3 e 4 no início do período de análise. A partir do dia Juliano 345 os valores medidos aumentaram, sendo que o lisímetro 1 apresentou superioridade em relação aos demais e o lisímetro 2 acompanhou o desempenho dos maiores, próximo a evapotranspiração de referência. Isto se deve à precipitação ocorrida neste período, como pode ser observada na Figura 1. De maneira geral, o valor de evapotranspiração medidos no lisímetro 1 foi em média de 36 % superior ao medido no lisímetro 2 função das áreas efetivas. As diferenças de valores são da ordem de 55 % em períodos secos e tendem a se aproximar (10 %) quando a umidade do solo aumenta em função da precipitação.

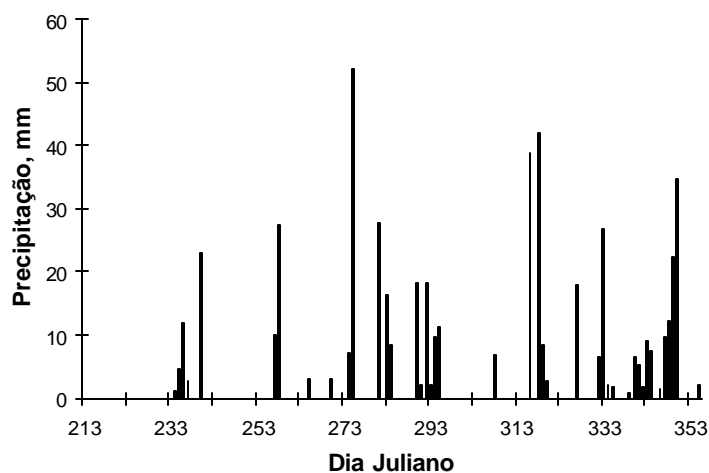


Figura 1 - Valores de precipitação durante o período analisado

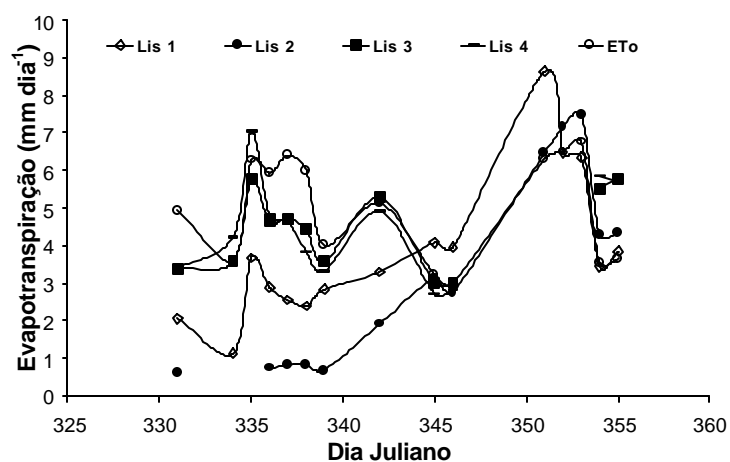


Figura 2 - Valores de evapotranspiração da lima ácida para os lisímetros 1, 2, 3 e 4.

Na Figura 3 estão plotados os dados de ETC da cultura e da evapotranspiração de referência (ETo) para os lisímetros 1 e 2, no período de 213 a 243, que se caracterizou pela baixa precipitação. Nota-se que os valores de evapotranspiração do lisímetro 1 sempre foram maiores que os valores de evapotranspiração do lisímetro 2, também na Figura 2 para o período mais úmido (Dezembro). No início do período (Agosto), como a superfície do solo estava seca, basicamente a perda de água se deu pelo processo de transpiração das plantas, que apresentavam áreas foliares semelhantes nos dois lisímetros estudados, e por isso, os valores medidos de ETC foram relacionados à

diferença de tamanhos dos equipamentos. Nos dias 214 e 227 foram realizadas irrigações, tendo estas refletidas nas medidas de evapotranspiração pelos lisímetros, como pode ser observadas na Figura 3. O efeito da irrigação foi mais acentuado no lisímetro 1 devido às diferenças das áreas efetiva, pois o lisímetro de área menor (lisímetro 1), quando submetido à irrigação por gotejamento, assume o mesmo comportamento de uma irrigação por aspersão, molhando totalmente a superfície do solo, aumentando assim a contribuição da evaporação do solo no valor total da evapotranspiração, ocorrendo um efeito menor no lisímetro 2. Os valores de evapotranspiração dos dois lisímetros foram semelhantes em períodos em que a superfície do solo é totalmente umedecida, como verificado nos dias 234, 235, 237 e 240, com precipitações de 1,2; 4,6; 12, 3 e 23 mm, respectivamente.

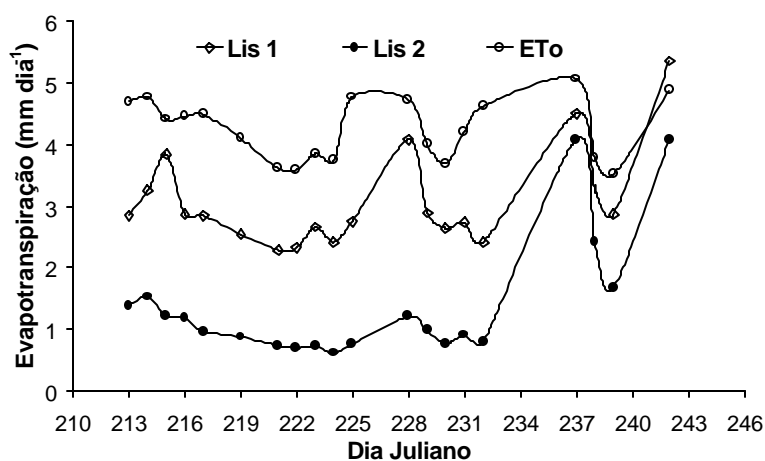
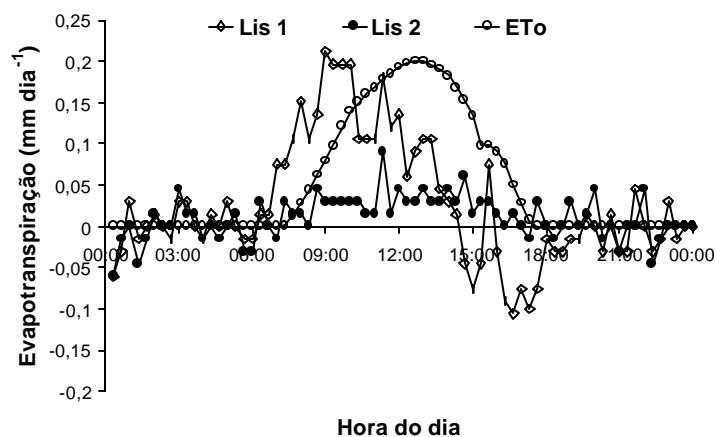


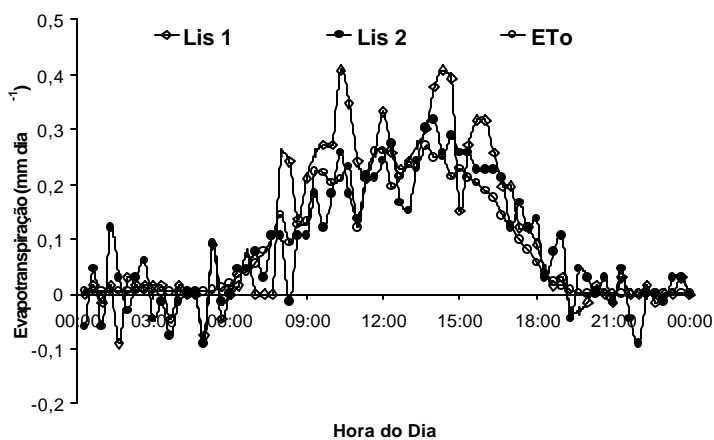
Figura 3 - Valores de evapotranspiração da cultura nos lisímetros 1 e 2 e de ETo, no mês de Agosto de 2001.

Na Figura 4 apresenta o curso de evapotranspiração da cultura ao longo de dois dias específicos (período seco e úmido) e a estimativa da evapotranspiração de referência pelo modelo de Penman-Monteith FAO-56. A Figura 4a apresenta os valores para um período seco (dia 230). Nota-se que ao longo do dia os valores de evapotranspiração do lisímetro 1 foram maiores quando comparados com o lisímetro 2, com total diário de 2,64 e 0,8 mm, respectivamente, e ETo de 3,7 mm. A Figura 4b

ilustra o período no qual o solo estava úmido (dia 351), quando os valores de ET_c e ET_o são maiores em comparação à Figura 4a, e a relação ET_c lisímetro 1 e ET_c lisímetro 2 é menor, em função da maior umidade do solo como discutido anteriormente. Os totais diários da evapotranspiração foram de 8 e 6,5 mm, para os lisímetros 1 e 2, respectivamente, e ET_o de 6,4 mm.



a



b

Figura 4 - Variação da evapotranspiração da culturas nos lisímetros e evapotranspiração de referência estimada pelo método de Penman-Monteith FAO-56: (a) para um dia seco, dia 230 e (b) dia úmido, 351.

Observa-se também na Figura 4, que ocorrem uma maior variabilidade das leituras de evapotranspiração a cada 20 minutos para o lisímetro 1. Isso ocorreu em função de sua menor massa, ficando este com maior suscetibilidade às oscilações devido a ação do vento. No dia 230 (Figura 4a) pode ser notado que o perfil de evapotranspiração não acompanhou a demanda atmosférica (ET_o), como foi observado no dia 351 (Figura 4b). Isso pode ser atribuído ao efeito do vento com valores médios de 1,81 e 0,85 para os dias 230 e 351, respectivamente. Nota-se que o perfil da evapotranspiração do lisímetro 1 possuiu uma queda acentuada nos seus valores, permanecendo negativo das 15:00 às 18:00 h. Esse fenômeno foi verificado na grande maioria dos dias analisados (Lisímetro 1) e se deve à diminuição das rajadas de ventos no período da tarde e conseqüentemente da força aplicada ao mesmo, o que promove alívio de peso nas células.

Na Tabela 1 são apresentados os valores totais de chuva, média de ET_c dos lisímetros 1 e 2, ET_o , relação entre ET_c dos lisímetros e ET_o , K_c ajustado, transpiração (T) e a relação entre transpiração e evapotranspiração (R) para os meses de Agosto a Dezembro de 2001. Os valores médios mensais de evapotranspiração da cultura e relações entre ET_c dos lisímetros e ET_o apresentados, refletem a discussão anterior, sendo menores para períodos secos e maiores para períodos úmidos. Observa-se também que os valores de ET_o variou pouco na maioria dos meses estudados, com aumento dos seus valores no mês de Dezembro. Esta não é a única razão para o aumento da ET_c , já que grande parte do processo de evapotranspiração se deve a evaporação do solo, como pode ser observado pela relação entre transpiração e evapotranspiração (R). No mês de Novembro, os valores de evapotranspiração aumentaram refletindo o maior crescimento da planta, com aumento da área foliar (Tabela 1) e conseqüentemente maior contribuição relativa da transpiração, principalmente no lisímetro 1, em função do seu tamanho.

Tabela 1. Valores mensais de total de chuva, evapotranspiração média (lisímetro 1 e 2), evapotranspiração de referência média (ETo), relação entre evapotranspiração da cultura e referência (ETclis/ETo), Kc e transpiração média (T, mm dia⁻¹) para um cultivo de lima ácida implantado em Junho de 2001.

Mês	P	ETc		ETo	$\frac{ET_{clis} \cdot 1}{ETo}$		Kc		T*	T		R	
		Lis 1	Lis 2		Lis 1	Lis 2	Lis 1	Lis 2		Lis 1	Lis 2		
A	43,7	3,07	1,24	4,1	0,75	0,3	0,0134	0,0215	-	-	-	-	-
S	43,6	3,3	1,64	4,25	0,78	0,39	0,0140	0,0280	1,4	0,35	0,33	0,08	0,08
O	174	3,51	3,11	4,23	0,83	0,74	0,0149	0,0531	1,5	0,38	0,38	0,08	0,08
N	152	3,43	3,01	4,25	0,81	0,71	0,0145	0,0510	2,8	0,7	0,7	0,16	0,16
D	115	3,77	3,52	5,13	0,73	0,69	0,0131	0,0495	-	-	-	-	-

* Os valores de área foliar média dos lisímetros para o período avaliado foram de 0,05; 0,09; 0,18; 0,4 e 0,47 para os meses de Agosto, Setembro, Outubro, Novembro e Dezembro, respectivamente.

Foram encontrados baixos valores de Kc, devendo-se à pequena transpiração média das plantas determinada periodicamente nos lisímetros (Tabela 1). A previsão é que os valores de Kc encontrados sejam compatíveis aos reportados em resultados de pesquisa quando a transpiração for maior, para um manejo agrônomico da cultura isento de ervas daninhas e com práticas de irrigação localizada. A escolha do melhor coeficiente de cultura para citrus no manejo da irrigação irá depender da condição das práticas agrônomicas no pomar, idade, espaçamento da cultura e o manejo da irrigação. Allen et al. (1998) recomenda um valor de Kc médio de 0,5 para da cultura sem ervas daninhas e menos de 20% de cobertura do solo. Esse valor é válido para manejo de irrigação localizada, sendo que este pode aumentar com a frequência de irrigação por aspersão ou chuvas, devendo ser corrigido e adequado para cada situação. Boman & Syvertesen (1991), trabalhando com lisímetro de drenagem de 3,5 metros de diâmetro, com irrigação localizada, encontraram valores de Kc próximos de 1 para a cultura com 6 anos de idade. Isso evidencia a grande parcela da transpiração neste estudo, visto que o lisímetro do referido autor possuía maior área que os lisímetros do presente trabalho.

Os resultados de Kc do presente trabalho podem ser utilizados nas fases iniciais da cultura de citrus no manejo da irrigação localizada, sendo de grande importância para

o uso racional dos recursos hídricos. Os resultados referentes ao lisímetro 1 se adequam mais à condição de manejo de irrigação por gotejamento, onde uma pequena fração do solo é umedecida, resultando em uma pequena fração de água evaporada em períodos de secamento de solo após a irrigação. Por isso, para uma demanda evapotranspirométrica qualquer, o volume de água calculado para ser repostado via irrigação utilizando os K_c 's da Tabela 1 para o lisímetro 1, será menor do que o calculado utilizando os K_c 's do lisímetro 2. As lâminas de irrigação calculadas em função dos K_c 's do lisímetro 2 serão em torno de 55 e 30% maiores que os valores encontrados para o lisímetro de 0,8 m, em períodos secos e úmidos, respectivamente.

5.4 Conclusões

A evapotranspiração da cultura variou em função da área efetiva dos lisímetros, sendo que as medidas realizadas no lisímetro 1 foram em média 36 % superior às observadas no lisímetro 2.

A evapotranspiração dos lisímetros aumentaram no período úmido em função da evaporação do solo, com diferença média de 10 % entre os lisímetros.

A variação dos valores de K_c foram de 0,0131 a 0,049 para os lisímetro 1 e 0,0215 a 0,0531 para o lisímetro 2.

6 CONCLUSÕES GERAIS

Com base nas informações, foram estabelecidas as seguintes conclusões:

Os lisímetros construídos apresentaram boa performance, detectando as variações de massa ao longo de um dia.

A metodologia de construção e montagem dos lisímetros de pesagem pode ser empregada para determinação da evapotranspiração.

Dias em que ocorrem precipitações intermitentes durante o período de radiação líquida positiva ($R_n > 0$) é aconselhável a sua eliminação.

a metodologia empregada na calibração dos lisímetros foi adequada, obtendo-se um coeficiente de determinação (r^2) de 0,99 na equação de calibração, com isso o equipamento pode ser utilizado com êxito em estudos de evapotranspiração.

Foram encontrada sensibilidade de 0,015; 0,015; 0,026 e 0,036 mm e exatidão de 0,038; 0,067; 0,045 e 0,1 mm para os lisímetros 1, 2, 3 e 4, respectivamente.

A metodologia para determinação da evapotranspiração utilizando o somatório das diferenças negativas ao longo do dia (ET_{c1}) superestima os valores de evapotranspiração em 17; 7; 7 e 8 % para os lisímetros 1, 2, 3 e 4, respectivamente, quando comparados com a determinação da evapotranspiração pela diferença de massa no final do dia (ET_{c3}), principalmente em dias em que ocorreram precipitações ou dias de vento fortes.

A metodologia para determinação da evapotranspiração utilizando o somatório das diferenças das massas pode ser utilizada, desde que descontados valores de precipitação e/ou irrigação.

O equipamento que utilizou a maior percentagem de área entre as paredes interna e externa (lisímetro 1) representou um maior superestimativa da somatória dos valores das diferenças negativas em comparação com a determinação da evapotranspiração pelo método padrão em função da maior oscilação provocada pelo vento.

A evapotranspiração do lisímetro menor foi superior em função do efeito borda.

A evapotranspiração dos lisímetros aumentaram no período úmido em função da evaporação do solo.

A variação dos valores de K_c foram de 0,0131 a 0,049 para os lisímetro 1 e 0,0215 a 0,0531 para o lisímetro 2.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABOUKALED, A.; ALFARO, A.; SMITH, M. **Lysimeters**. Rome: FAO, 1982. 68p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 39).
- ALLEN, R. G.; FISCHER, D. K. Low-cost electronic weighing lysimeter. **Transactions of the ASAE**, v 33 n. 6, p 1823-1833, 1990.
- ALLEN, R. G.; FISCHER, D. K. Direct load cell-based weighing lysimeter system. In: ALLEN, R. G.; HOWELL, T. A.; PRUITT, W. O. et al. (Ed.) **Lysimeter for evapotranspiration and environmental measurements**. New York: American Society of Civil Engineers, 1991. p. 114-124.
- ALLEN, R. G.; PRUITT, W. O. ; JENSEN, M. E. Environmental requirements of lysimeters. In: ALLEN, R. G.; HOWELL, T. A.; PRUITT, W. O. et al. (Ed.) **Lysimeter for evapotranspiration and environmental measurements**. New York: American Society of Civil Engineers, 1991. p. 170-181.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D. et al. **Crop evapotranspiration : guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998 300p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).
- BOMAN, B. J.; SYVERTSEN, J. P. Drainage lysimeters for high water table citrus studies. In: ALLEN, R. G.; HOWELL, T. A.; PRUITT, W. O. et al. (Ed.) **Lysimeter for evapotranspiration and environmental measurements**. New York: American Society of Civil Engineers, 1991. p. 318-325.

- BLOON, A. J. Principles of instrumentation for physiological ecology. In: PEARCY, R. W.; EHLERINGER, J. R.; MOONEY, H. A. et al. (Ed) **Plant physiological ecology: field methods and instrumentation**. London: Chapman and Hall, 1992. p.1-13.
- CAMPECHE, L. F. S. M.; FOLEGATTI, M. V.; COELHO FILHO, M. A. Metodologia para calibração de lisímetro de pesagem. In: CONGRESSO BRASILEIRO AGROMETEOROLOGIA, REUNIÃO LATINO-AMERICANA DE AGROMETEOROLOGIA, 2001. **Anais**. Fortaleza: SBA, 2001. V 2, p. 898-899.
- COELHO, Y. S. **Lima ácida ‘Tahiti’**: aspectos da produção. Brasília: MAARA;SDR, 1993. 35p. (Serie Publicações Técnicas FRUPEX, 1).
- DOORENBOS, J.; PRUITT, J. O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. Rome: FAO, 1977. 179p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 24).
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979. 179p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 33).
- FIGUEIREDO, J, O. Variedades-copa de citros. In: ENCONTRO PARANAENSE DE CITRICULTURA, 1, Curitiba, 1986. Curitiba, 1986. p. 59-78.
- FISCHER, D. K.; ALLEN, R. G. Accuracies of lysimeter data acquisition systems. In: ALLEN, R. G.; HOWELL, T. A.; PRUITT, W. O. et al. (Ed.) **Lysimeter for evapotranspiration and environmental measurements**. New York: American Society of Civil Engineers, 1991. p. 406-415.
- FNP CONSULTORIA & COMÉRCIO. **Agrianual 98**: anuário Estatístico da Agricultura Brasileira. São Paulo. 1998. 481p.

- GAYET, J. P. **Cultura, colheita, beneficiamento, transporte e comercialização da lima ácida 'Tahiti' (*Citrus latifolia* Tan)** Conchal: Frutal agro-exportadora. 1991. 42p.
- GAYET, J. P.; BLEINROTH, E. W.; MATALLO, M. et al. **Lima ácia 'Taihit' para exportação: procedimentos de colheita e pós-colheita.** Brasília: MAARA/SDR, 1995. 36p. (Serie Publicações Técnicas FRUPEX, 12).
- GREBET, P. Precision lysimetry in France. In: ALLEN, R. G.; HOWELL, T. A.; PRUITT, W. O. et al. (Ed.) **Lysimeter for evapotranspiration and environmental measurements.** New York: American Society of Civil Engineers, 1991. p. 105-113
- GREBET, P.; CUENCA, R. History of lysimeter desing of environmental disturbances. In: ALLEN, R. G.; HOWELL, T. A.; PRUITT, W. O. et al. (Ed.) **Lysimeter for evapotranspiration and environmental measurements.** New York: American Society of Civil Engineers, 1991. p. 10-18.
- GUETING, W. Relationship between lysimeter area and evapotranspiration (ET). In: ALLEN, R. G.; HOWELL, T. A.; PRUITT, W. O. et al. (Ed.) **Lysimeter for evapotranspiration and environmental measurements.** New York: American Society of Civil Engineers, 1991. p. 416-422.
- HOWELL, T. A.; SCHNEIDER, A. D.; JENSEN, M. E. History of lysimeter desing and use for evapotranspiration measurements. In: ALLEN, R. G.; HOWELL, T. A.; PRUITT, W. O. et al. (Ed.) **Lysimeter for evapotranspiration and environmental measurements.** New York: American Society of Civil Engineers, 1991. p. 1-9.
- HOWELL, T. A.; SCHINEIDER, A. D.; DUSEK, D. A. et al. Calibration and scale performance of Bushland weighing lysimeters. **Transactions of the ASAE**, v 38 n. 4, p 1019-1024, 1995.

- KHAN, B. R.; MAINUDDIN, M.; MOLLA M. N. Desing, construction and testing of a lysimeter for a study of evapotrasnpiration of different crops. **Agricultural Water Management**, v. 23, p.183-197, 1993.
- KOHNKE, H.; DREIBELBIS, F. R.; DAVIDSON, J. M. A survey and discussion of lysimeters and bibliography on their construction and performance. **Miscelaneus . Publication**, n.372, 68p. 1940.
- MARCONDES, P. T. S. Manejo do florescimento e da produção da lima ácida ‘Tahiti’ com reguladores de crescimento e derricha. Cruz das Almas, 1991, 120p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Agronomia, Universidade Federal da Bahia.
- MARIN, F. R. Evapotranspiração, transpiração e balanço de energia em pomar de lima ácida ‘Tahiti’. Piracicaba, 2000. 74p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de são Paulo.
- MARIN, F. R.; ANGELOCCI, L. R.; PEREIRA, A. R. et al. Relação entre evapotranspiração máxima num pequeno pomar de lima ácida ‘Tahiti’. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, REUNIÃO LATINO-AMERICANA DE AGROMETEOROLOGIA, 2001. **Anais**. Fortaleza: SBA, 2001. v 2, p. 667-668.
- McFARLAND, M. J.; WORTHINGTON, J. W.; NEWMAN, J. S. Desing, instalation and operation of a twin weighing lysimeter for fruitt trees. **Transactions of the ASAE**, v 26 n. 6, p 1717-1721. 1983.
- MESHKAT, M.; WARNER, R. C.; WALTON, L. C. Lysimeter design, construction, and instrumentation for assessing evaporation from a large undisturbed soil monolith. **Transactions of the ASAE**, v 15 n. 4, p 303-308. 1999.
- PASSOS, O. S.; COELHO, Y. S.; CUNHA SOBRINHO, A. P. Variedades de copa e porta-exertos de citros. In: ENCONTRO NACIONAL DE CITRICULURA, 4, Aracajú, 1977. **Anais**. Aracajú: Sociedade Brasileira de Fruticultura, 1977. p.21-41.

- PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183p.
- PEREIRA, A. R.; MARIN, F. R.; ANGELOCCI, L. R. et al. Dificuldades com métodos micrometeorológicos num pomar de lima ácida 'Tahiti'. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, REUNIÃO LATINO-AMERICANA DE AGROMETEOROLOGIA, 2001. **Anais**. Fortaleza: SBA, 2001. v 2, p. 719-720.
- PEREIRA, F. A. C. Desempenho do modelo de Penman-Monteith e de dois evaporímetros na estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) em relação a um lisímetro de pesagem. Piracicaba, 1998. 87p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.
- PHENE, C. J.; HOFFMAN, G. J.; HOWELL, T. A.; et al. Automated lysimeter for irrigation and drainage control. In: ALLEN, R. G.; HOWELL, T. A.; PRUITT, W. O. et al. (Ed.) **Lysimeter for evapotranspiration and environmental measurements**. New York: American Society of Civil Engineers, 1991. p. 28-36.
- PHENE, C. J.; McCORMICK, R. L.; DAVIS, K. R. et al. A lysimeter feedback irrigation controller system for evapotranspiration measurements and real time irrigation scheduling. **Transaction of the ASAE**, v.32, n.4, p.477-484, 1989.
- PRUITT, W. O.; ANGUS, D. E. large weighing lysimeter for measuring evapotranspiration. **Transaction of the ASAE**, v.3, n.2, p.13-18, 1960.
- PRUITT, W. O.; LOURENCE, F. G. Experiences in lysimeter for ET and surface drag measurements. In: NATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN EVAPOTRANSPIRATION, Chicago, 1985: **Advances in evapotranspiration: proceedings**. St. Joseph: ASAE, 1985. p.51-69. (ASAE. Publication, 14-85).

- SANTIAGO, A. V. Evapotranspiração de referência medida por lisímetro de pesagem e estimada por Penman-Monteith (FAO 56), nas escalas mensal e decendial. Piracicaba, 2001. 37p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.
- SCHNEIDER, A. D.; HOWELL, T. A.; MOUSTAFA, A. T. et al. A simplifield weighing lysimeter for monolithic soil or reconstructed soils. **Transactions of the ASAE**, v14 n.3, p 267-273. 1998.
- SEDIYAMA, G. C. Estimativa da evapotranspiração: histórico, evolução e análise crítica. **Revista Brasileira de Agrmeteorologia**, v. 4, n. 1p.i xii, 1996.
- SENTELHAS, P. C.; PEREIRA, A. R. A maior estiagem do século? **Notícias Piracena**, v.6, n.50, p.1, 2000.
- SILVA, F. C. Uso de dispositivos lisimétricos para medida da evapotranspiração de referência. Piracicaba, 1996. 73p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.
- SILVA, F. C. Determinação da evapotranspiração utilizando o método do balanço de energia e lisímetro de pesagem. Piracicaba, 2000. 72p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.
- SILVA, F. C.; FOLEGATTI, M.V.; MAGIOTTO, S. R. Análise do funcionamento de um lisímetro de pesagem com célula de carga. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 7, n. 1, p.53-58, Jan./Jun. 1999.
- THORNTWAITE, C. W.; WILM, H. G.; MATHER, J. R. et al. Report of the committee on evaporation and transpiration. **Transactions of the American Geological Institute**, v.27, n.5, p.721-723, 1946.

- TREJO-CHANDIA, J. E. Avaliação do método de balanço de calor na estimativa da transpiração em tomateiros, plantas de milho e mudas de limoeiro. Piracicaba, 1997. 75p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.
- VIEIRA, D. B.; RIBEIRO T. A. P. Estudo de parâmetros básicos de irrigação do limão tahiti (*Citrus limonia* OSBECK) sob micro-aspersão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 1993. **Anais**. Ilhéus: SBEA; CEPLAC, 1993. v. 4, p. 2328-2339.
- WRIGHT, J. L. Using weighing lysimeters to develop evapotranspiration crop coefficients. In: ALLEN, R. G.; HOWELL, T. A.; PRUITT, W. O. et al. (Ed.) **Lysimeter for evapotranspiration and environmental measurements**. New York: American Society of Civil Engineers, 1991. p. 191-199.