

LISÍMETRO DE PESAGEM E DE LENÇOL FREÁTICO DE NÍVEL CONSTANTE PARA USO EM AMBIENTE PROTEGIDO¹

LUCAS MELO VELLAME^{2*}, MAURICIO ANTÔNIO COELHO FILHO³,
EUGÊNIO FERREIRA COELHO³, EUSÍMIO FELISBINO FRAGA JÚNIOR²

RESUMO - O presente trabalho teve como objetivo construir e calibrar lisímetros de pesagem de pequena capacidade e comparar o funcionamento destes com lisímetros de lençol freático de nível constante. No laboratório de Irrigação da Embrapa/CNPMPF, em Cruz das Almas - BA, foram construídos quatro lisímetros em vasos de 15 e 50 litros, sendo dois de pesagem e outros dois de lençol freático de nível constante. Determinou-se a incerteza nas medições e os erros de linearidade, repetitividade e histerese para os lisímetros de pesagem. Mediu-se a transpiração de laranjeiras por meio dos lisímetros e com uso de um medidor de fluxo de seiva por balanço de calor. O erro máximo em percentual de final de escala apresentado no lisímetro de 140 kg foi 129%, a repetitividade 83% e a linearidade 117% superiores ao lisímetro de 45 kg de capacidade. A incerteza nas medições (95% de confiança) foi sempre inferior a 0,0018% da capacidade de ambas as células correspondendo a 0,8237 g para o lisímetro de 45 kg e 2,5366 g para o lisímetro de 140 kg. A transpiração medida pelos lisímetros de pesagem e lençol freático constante apresentou boa concordância dos valores com um desvio médio de 3,25%.

Palavras-chave: Evapotranspiração. Transpiração. Precisão. Linearidade. Histerese.

CONSTANT LEVEL WATER TABLE WEIGHT LYSIMETER FOR GREENHOUSE

ABSTRACT - This paper had as objective to build and to calibrate weight lysimeters of low capacity and to establish comparisons between the working status of constant level water table lysimeters. Two weight lysimeters of 15-L and 50-L and two constant level water table lysimeters of 15-L and 50-L were built at Embrapa Mandioca & Fruticultura Irrigation and Fertirrigation Laboratory, Cruz das Almas - BA, Brazil. Linearity, repetitivity and hysteresis errors in the range of reading of the weight lysimeter. Simultaneously measurements of soil evaporation were performed on bare soil with the two lysimeters in a 1-h interval. Afterwards, orange transpiration was measured by using lysimeters and by using a heat balance sap flow equipment. Results showed that the relation between analogical signals and the standard mass in the lysimeter provided linear equation with reasonable goodness of fit. The systematic and random errors were larger in the lysimeters of larger capacity. The instruments were able to make readings with good stability during the days of measurements and were also able to detect mass variation due to hourly transpiration. However, the measurements were in agreement if comparing average three day data.

Keywords: Evapotranspiration. Transpiration. Precision. Linearity. Hysteresis.

*Autor para correspondência.

Recebido para publicação em 16/03/2011; aceito em 18/09/2011.

²Pós graduação em Irrigação e Drenagem ESALQ/USP, av. Pádua Dias, 11 Caixa Postal 9, 13418-900, Piracicaba - SP; lucasvella-me@gmail.com; eusimio@ymail.com

³Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical, 44380-000, Cruz das Almas - BA; macoelho@cnpmpf.embrapa.br; ecoelho@cnpmpf.embrapa.br

INTRODUÇÃO

Em estudos da necessidade de água das plantas têm sido utilizados métodos baseados no solo (balanço hídrico), em dados agrometeorológicos (razão de Bowen, aerodinâmico, Penman-Monteith, etc.) e também em medidas direta na planta (fluxo de seiva, transpiração e potencial da água nas folhas). O uso de lisímetros de pesagem serve como 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 projetados, calibrados e manejados medem precisamente e representativamente a evapotranspiração das culturas, integrando as variáveis do ambiente que regem tal processo (CARVALHO et al., 2007).

Lisímetros de pequena capacidade podem ser usados na medição da evapotranspiração em plantas de pequeno porte. São indicados também para culturas de grande porte no início do ciclo de desenvolvimento, isso em decorrência de sua menor resolução, podendo ser usados tanto em viveiros de mudas, quanto no campo, nas etapas iniciais de desenvolvimento. O uso de lisímetros de pequeno porte viabiliza o aumento do número de repetições em um tratamento, melhorando assim a significância estatística, segundo conclusões de Waugh et al. (1991) em trabalho em que foram utilizados lisímetros construídos com tubos de diâmetro de 30,4 cm usando uma célula de carga de 100 libras (45,36 Kg). Outra aplicação é seu uso em conjunto com lisímetros maiores em estudos que usam a separação da contribuição nos processos de evaporação e transpiração (LIU et al., 2002).

As limitações desses instrumentos quanto à representatividade são de pouca importância em condição de ambiente protegido quando usados na calibração de outros sistemas, como em medidas de fluxo de seiva (COELHO FILHO et al., 2005). Entretanto para sua utilização como instrumento padrão é essencial o conhecimento das características técnicas do sistema de medição bem como a quantificação dos erros envolvidos. Segundo Carvalho et al. (2007) os erros de medição citados na literatura tem definições confusas e muitas vezes são usados incorretamente. A Portaria 029 de 10 de março de 1995 do INMETRO estabelece a definição de vários parâmetros metrológicos. Com base nessas definições Gonçalves Jr (2004) cita algumas metodologias que podem ser usadas na análise de desempenho de lisímetros de pesagem.

Segundo Machado e Mattos (2001) recentemente tem sido bastante utilizados lisímetros com lençol freático constante, devido a sua boa precisão e a facilidade em variar a profundidade do lençol no seu interior. Este tipo de equipamento encontra-se bastante difundido no Brasil. Moura et al. (1994) utilizaram lisímetros com lençol freático constante em seus experimentos para a determinação do consu-

mo de água pelas culturas, e constatarem a facilidade de operação e boa precisão. A dificuldade em se automatizar as leituras é uma desvantagem desse tipo de lisímetro.

O presente trabalho teve como objetivo construir lisímetros de pesagem e de lençol freático constante para vasos de pequena capacidade definindo os erros presentes nas medições de cada sistema e estabelecer comparações entre os dois tipos de lisímetros.

MATERIAL E MÉTODOS

No laboratório de Irrigação da EMBRAPA Mandioca e Fruticultura Tropical, em Cruz das Almas/BA, foram construídos quatro lisímetros em vasos de 15 litros e 50 litros, sendo dois de pesagem e outros dois de lençol freático de nível constante.

Internamente os vasos foram preenchidos com uma camada de brita e espuma de 5 mm colocada entre a brita e o solo. O solo usado foi seco ao ar e passado por peneira de malha 2 mm. O sistema de drenagem dos vasos é constituído de uma mangueira de ½ polegada acoplada por meio de um adaptador soldado na parte inferior dos vasos.

As plataformas de pesagem utilizadas nos lisímetros de pesagem foram construídas com células de carga “tipo I” com 45 e 140 kg de capacidade centralizadas entre duas chapas de aço reforçadas por cantoneiras também de aço. As células de carga utilizadas apresentam nominalmente uma sensibilidade de 2mV por volt de alimentação na capacidade máxima. A alimentação das células de carga e medição do sinal emitido foi realizado com o sistema de aquisição de dados “datalogger” CR10X (Campbell, Sci).

Para efetuar a calibração do lisímetro de pesagem massas de 2000, 1000, 500, 200 gramas foram confeccionadas usando sacos com brita pesados em balança analítica. Além dessas massas utilizou-se massas padrões comerciais de 50, 20, 10, 5 e 2 gramas (Figura 1). O sistema de pesagem foi calibrado segundo metodologia sugerida por Wheeler e Ganji (1996) e aplicado na calibração de um sistema de medição de massa por Santos et al. (2006) e para tensiômetros por Vellame e Oliveira (2005). Foram determinados o erro máximo e os erros de repetitividade, linearidade e histerese do instrumento na faixa de medição usada pelo lisímetro.

Inicialmente foi determinada a relação, por meio de regressão linear, entre a massa aplicada e os sinais analógicos medidos. O relacionamento entre a grandeza de entrada de um sistema de medição e a sua resposta (saída) pode ser expresso por meio de uma equação. Entretanto o sistema de medição apresenta erros sistemáticos e erros aleatórios, sendo, portanto melhor caracterizada por uma linha média (indicação média) e uma faixa de dispersão associada, geralmente estimada pela repetitividade.

(GONÇALVES JR, 2004). A fim de se quantificar os erros apresentados pelos lisímetros em unidades de massa, todos os dados de sinal (mV) foram convertidos em unidades de massa por meio das equações encontradas. Os desvios foram calculados pela diferença entre a massa aplicada e o sinal convertido.

O erro máximo segundo Gonçalves Jr (2004) expressa a faixa onde se espera que estejam contidos todos os erros (em termos absolutos) do sistema de medição, considerando toda a sua faixa de medição e as condições operacionais fixadas pelo seu fabricante. O erro máximo de um sistema de medição é o parâmetro reduzido que melhor descreve a qualidade do instrumento. Wheeler e Ganji (1996) usam este parâmetro para definir os limites de acurácia. Considerou-se neste trabalho como erro máximo o maior desvio absoluto apresentado no processo de calibração.

Wheeler e Ganji (1996) descrevem o termo “precision” como indicador da variabilidade das medidas em torno do seu valor verdadeiro (erro aleatório). A Portaria Inmetro 029 (1995) que assegura compatibilidade com normas internacionais da ISO (International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology) observa que o termo precisão não deve ser utilizado, pois é um conceito qualitativo. Segundo esta portaria, o erro do sistema de medição pode ser dividido em sistemáticos e aleatórios, cuja representação gráfica da distinção entre os mesmos encontram-se na Figura 1.

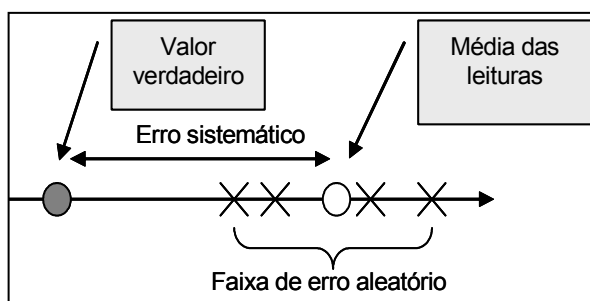


Figura 1. Distinção entre os erros sistemáticos e aleatórios.

Erro sistemático é a parcela do erro que se repete quando uma série de medições é efetuada nas mesmas condições. Numericamente corresponde à média de um número infinito de medições do mesmo mensurando (efetuadas sobre condições de repetitividade) menos o valor verdadeiro do mensurando. O principal erro sistemático é o de linearidade, dada a maior complexidade de compensação ou correção. Pode tanto ser causado por um problema de ajuste ou desgaste do sistema de medição, quanto por fatores construtivos. Também pode estar associado ao próprio princípio de medição empregado ou ainda ser influenciado por grandezas ou fatores externos, como as condições ambientais. Para se calcular o erro de linearidade foi estabelecida uma reta de referência pelo método dos mínimos quadrados aplicado aos desvios médios. O erro de linearidade foi determina-

do pela máxima distância dos desvios médios em relação à reta.

Segundo a Portaria Inmetro 029 (1995) o erro aleatório é igual ao erro de medição menos o erro sistemático. A repetitividade específica a faixa de valores dentro da qual se situa o erro aleatório. O erro de repetitividade foi determinado pelo maior desvio entre as medidas em sucessivas medições.

O erro de histerese foi calculado pela máxima diferença em todos os ciclos de leitura entre as medições feitas em ordem crescente e decrescente para um mesmo valor de massa.

Para se comparar os erros dos dois sistemas de pesagem, os erros em unidade de massa (E) foram expressos em percentual de final de escala (%FE) segundo a equação 1:

$$\%FE = \frac{E}{C} \times 100 \quad (1)$$

sendo C é a capacidade da célula de carga na mesma unidade do erro;

A determinação dos erros aleatórios e sistemáticos deve ser feita sob condições de repetitividade, expressando a qualidade do sensor. Para quantificar a confiabilidade das medidas lisimétricas operando nas condições reais de funcionamento, calculou-se a incerteza das medições segundo metodologia proposta por Gonçalves Jr (2004). Considerando como nula a variação de massa nos lisímetros de pesagem durante o período noturno, as medidas foram realizadas a cada segundo e a média e o desvio padrão (σ) foram gravados a cada minuto. A incerteza (I) das medições foi calculada pela equação 2 sendo t o coeficiente de Student para as 60 medidas a 95% de confiabilidade e n o número de medidas:

$$I = \frac{\sigma \cdot t}{\sqrt{n}} \quad (2)$$

A fim de se comparar a performance dos dois sistemas, os valores de incerteza foram convertidos em percentuais relativos à capacidade das células substituindo os valores de E da equação 1 pela incerteza (I).

O lisímetro de lençol freático de nível constante funciona acoplado-se a mangueira de dreno do vaso em um reservatório que tem seu nível controlado por meio de uma bóia. Controla-se o nível do lençol freático pela altura que se encontra este reservatório em relação ao vaso com solo. O consumo de água pode ser medido pelo rebaixamento do nível do tanque que alimenta este reservatório. A montagem do sistema foi idealizada de forma a possibilitar um uso portátil do equipamento.

Por meio de um sistema de vasos comunicantes, com acoplamento pelo dreno, foi formado um lençol freático no solo do lisímetro de pesagem. Procedimento utilizado manter o solo deste lisímetro em

co constante. Medições simultâneas da evaporação com solo descoberto foram efetuadas com os dois tipos de lisímetros em intervalos de uma hora (Figura 2).

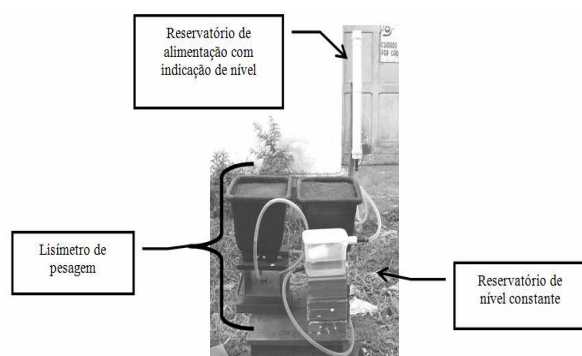


Figura 2. Lisímetro de pesagem e de lençol freático constante em medição com solo descoberto.

Posteriormente, de forma semelhante às medições efetuadas em solo descoberto, foram efetuadas medições da transpiração de plantas de laranja com o uso dos lisímetros. O solo do sistema foi coberto com lona plástica para evitar a evaporação de água no solo. Nesta configuração foram realizadas simultaneamente medidas de fluxo de seiva com uso do método de balanço de calor caulinar (COELHO FILHO et al., 2005). A fim de se estabelecer comparações entre as medidas lisimétricas com plantas diferentes foram medidas as áreas foliares de cada planta e a transpiração foi expressa por unidade de área foliar.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 3 são apresentados os resultados obtidos pela relação entre as medições dos sinais analógicos e as massas padrões colocadas no lisímetro. Observa-se um bom grau de correlação entre as variáveis. Na mesma Figura são apresentados os desvios médios apresentados e a representação gráfica do erro de linearidade.

Na Tabela 1 estão explicitados os erros de linearidade, repetitividade e histerese do instrumento. Os erros sistemáticos da célula de carga são de pouca importância em lisímetros de pesagem contínua visto que as diferenças de massa são calculadas em curta faixa de medição e a massa do mesmo geralmente é determinada por uma curva de calibração. O erro sistemático de maior importância é o de linearidade uma vez que sua compensação ou correção é mais complexa. A repetitividade por meio dessa análise é o fator que mais interfere na acurácia dos instrumentos. Sendo esse parâmetro o mais afetado por fatores não controlados no processo de calibração como instabilidade durante o manuseio das massas padrões no lisímetro, além de fatores ambientais como o vento. O erro de repetitividade tende a ser

minimizado em medições ambientais já que são tomadas médias de diversas leituras. Isso se dá devido à baixa variabilidade temporal das medidas ambientais (médias horárias) e a possibilidade de leitura em pequenos intervalos pelos sistemas de aquisição de dados (menores que 10 s).

Tanto os erros sistemáticos como aleatórios foram maiores no lisímetro de maior capacidade tanto em valores absolutos (massa), quanto relativos à capacidade da célula de carga. O erro máximo em percentual de final de escala apresentado no lisímetro de 140 kg foi 129%, a repetitividade 83% e a linearidade 117% superiores ao lisímetro de 45kg de capacidade. Isso pode ser explicado tanto pela qualidade do sensor utilizado, como também pelo fato das forças de torção que atuam sobre a plataforma serem maiores devido à altura do vaso.

Na Figura 4 temos a representação gráfica das incertezas nas medições lisimétricas no período noturno. A incerteza nas medições (95% de confiança) foi sempre inferior a 0,0018% da capacidade de ambas as células o que corresponde a 0,8237 g para o lisímetro de 45 kg e 2,5366 g para o lisímetro de 140 kg. Esse erro é pequeno considerando que o sistema possui uma resolução de 1g nas medidas abaixo de 100 kg e de 10 g em medidas acima deste valor (5 dígitos). Vale ressaltar que esses valores foram tomados em médias de 1 minuto com leituras a cada 10 segundos. Médias tomadas em intervalos maiores tendem a apresentar incertezas menores.

Apesar da diferença de performance das células apresentadas na Tabela 1, observa-se pela comparação dos gráficos a e b da Figura 6 que o fator preponderante nos erros envolvidos nas medidas lisimétricas em condições reais de funcionamento é a capacidade das células de carga. Convencionalmente, em lisímetros de pesagem, são utilizadas células de capacidade muito maior que a faixa de medição, resultando em erros maiores, como observado na Figura 6a. Verificar, pela figura 6b, que ao se padronizar as incertezas pela capacidade da célula de carga, há uma aproximação dos valores independente da capacidade da célula utilizada.

Uma solução para este problema é o uso de sistemas mecânicos de redução de peso por meio de alavancas e contrapeso para eliminar o peso morto do lisímetro, como apresentado por Faria et al. (2006). Esses autores utilizaram um sistema que reduz em 45 vezes a carga aplicada a uma célula de carga de 100 kg. Os desvios encontrados pelos autores foram inferiores a 0,03 kg em lisímetros de 3 m² de área. Entretanto esse sistema apresenta maiores dificuldades construtivas principalmente em lisímetros de pequeno porte.

Na Figura 5 estão ilustrados os resultados da medição da transpiração de mudas de laranja determinadas pelos lisímetros de pesagem e por fluxo de seiva ambos em litros.hora⁻¹. Com base no método de balanço de calor caulinar, ambos lisímetros foram capazes de realizar leituras durante os dias de medi-

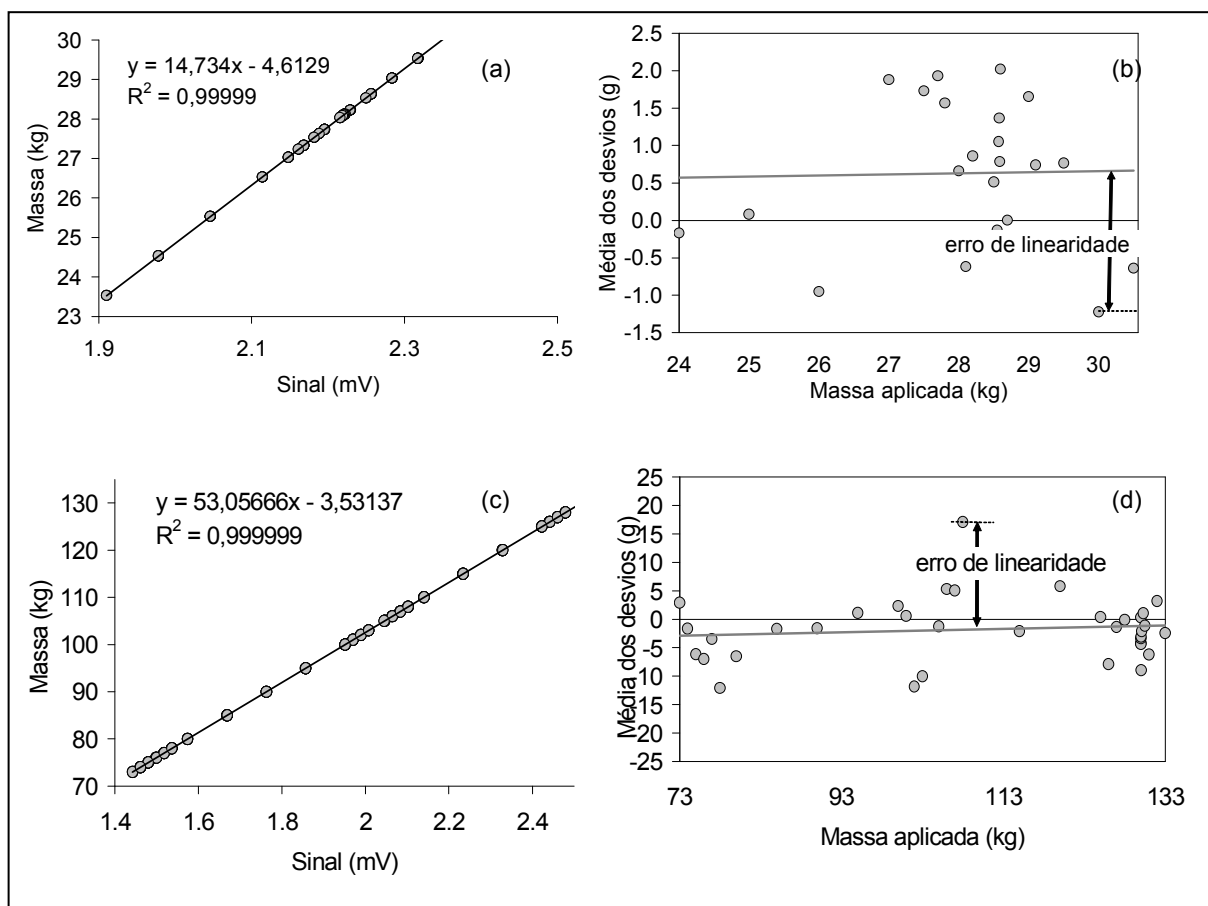


Figura 3. Curva de calibração (a, c) e desvios médios (b, d) apresentados pelo lisímetro de pesagem de 45 kg e 140 kg de capacidade respectivamente.

Tabela 1. Características técnicas dos lisímetros de pesagem.

Erro	Lisímetro 45 kg		Lisímetro 140 kg	
	Massa (g)	% VFE (*)	Massa (g)	% FE (*)
Erro máximo	6,53	0,014	44,65	0,032
Repetitividade	10,31	0,023	58,36	0,042
Linearidade	1,71	0,006	17,74	0,013
Histerese	8,84	0,019	21,46	0,015

(*) Percentual relativo ao valor de final de escala da célula de carga

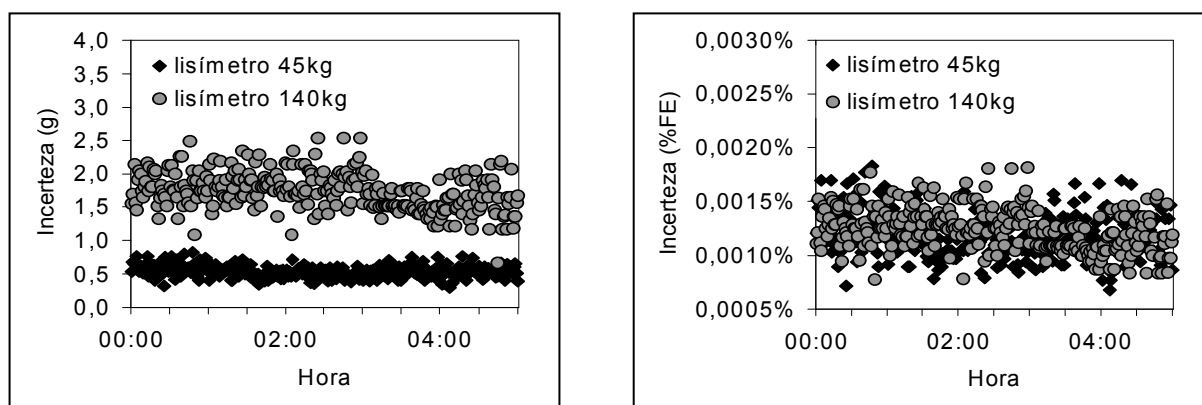


Figura 4. Incerteza das medições em valores absolutos (a) e relativos ao final de escala das células de carga (%FE) (b) utilizadas nos lisímetros de pesagem.

ção detectando variações de massa provenientes da transpiração em intervalos de 1 hora. Também se observa boa estabilidade dos lisímetros já que conservam constantes suas características metrológicas ao longo do tempo. Essas características podem ser observadas pela similaridade nas variações de fluxo

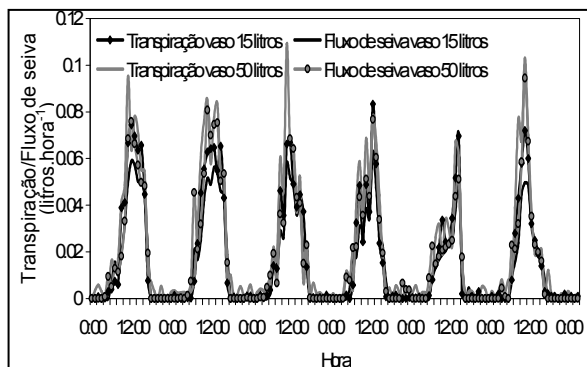


Figura 5. Curso da transpiração e fluxo de seiva ao longo de seis dias de medições simultâneas.

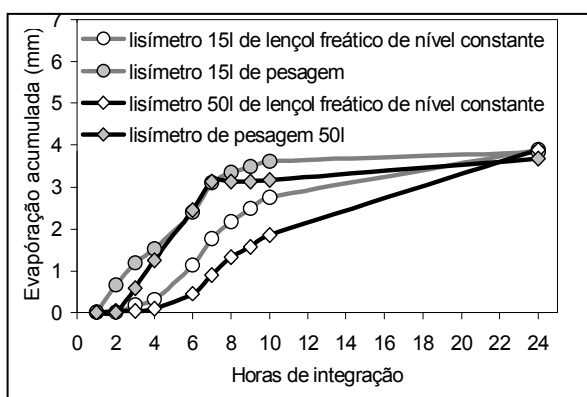


Figura 6. Evaporação acumulada medida a partir de 8 h em solo descoberto por lisímetros de pesagem e lençol freático constante.

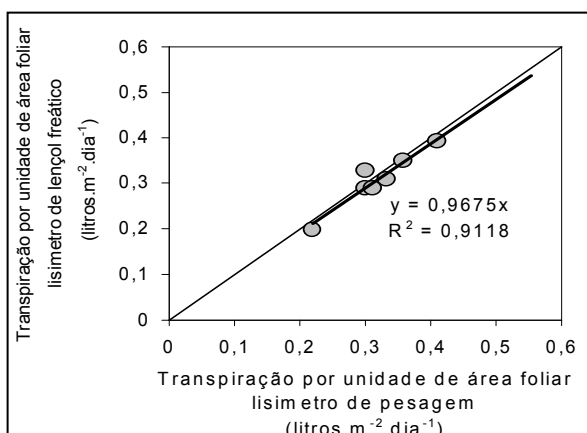


Figura 7. Relação entre a transpiração por unidade de área foliar diária ($\text{litros m}^{-2} \text{dia}^{-1}$) de plantas de laranja por lisímetros de pesagem e lençol freático constante.

A Figura 6 ilustra a evaporação acumulada em incrementos horários por meio dos lisímetros,

referente às medidas com solo descoberto. Observa-se que os lisímetros de lençol freático constante subestimam a evaporação durante todo o período diurno. Entretanto em períodos de 24 horas as leituras se aproximam bastante, como pode ser observado na figura. Isso se dá provavelmente pelo tempo que leva a ascensão da água por capilaridade até a superfície do solo.

Na Figura 7 temos a relação entre as medidas de transpiração por unidade de área foliar entre os sistemas testados em escala diária. Considerando que os sistemas de medição e as plantas são diferentes os lisímetros apresentaram boa concordância entre as medidas com média das diferenças absolutas de 3,25%.

CONCLUSÕES

Os lisímetros de pesagem apresentam coeficientes de desempenho que possibilitam sua utilização como instrumentos padrão em medidas de evapotranspiração;

O lisímetro de pesagem, de menor capacidade, apresenta erros aleatórios e sistemáticos menores tanto em valores absolutos quanto relativos à capacidade da célula;

O fator preponderante nos erros envolvidos em medidas lisimétricas em condições reais de funcionamento é a capacidade das células de carga;

Os lisímetros de lençol freático constante apresentam em escala diária (24 h) boa concordância com os valores de transpiração medidos por lisímetros de pesagem.

REFERÊNCIAS

- CARVALHO, D. F. et al. Instalação, calibração e funcionamento de um lisímetro de pesagem. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 2, p. 363-372, 2007.
- COELHO FILHO, M. A. et al. Field determination of young acid lime plants transpiration by the stem heat balance method. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 62, n. 3, p. 240-247, 2005.
- FARIA, R. T.; CAMPECHE, F. S. M.; CHIBANA, E. Y. Construção e calibração de lisímetros de alta precisão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 1, p. 237-242, 2006.
- GONÇALVES JR, A. A. Laboratório de Metrologia e Automação Dep. de Engenharia Mecânica Universidade Federal de Santa Catarina. **Apostila de metrologia Parte 1**. Disponível em: <<http://www.unifenas.br/radiologia/biblioteca>>. Acesso em:

17/08/2006.

LIU, C; ZHANG; X; ZHANG, Y. Determination of daily evaporation and evapotranspiration of winter wheat and maize by large-scale weighing lysimeter and micro-lysimeter. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 111, n. 2, p. 109-120, 2002.

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

MIRANDA, F. R.; YOLDER, R. E.; SOUZA, F. Instalação e calibração de um lisímetro de pesagem no projeto de irrigação Curu-Paraipaba, CE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 3, n. 1, p.107-110, 1999.

MOURA, M. T. V. et al. Estimativa do consumo de água na cultura da cenoura (*Daucus carota* L.) v. Nantes Superior, para a região de Piracicaba, através do método do balanço hídrico. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 51, n. 2, p.284-291, 1994.

Portaria Inmetro 029. **Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia – VIM. INMETRO** - Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial, 1995. 78 p.

SANTOS, R. M. et al. Montagem e acurácia de um sistema experimental de pesagem para calibração de sensores de umidade do solo. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 30, n. 6, p. 1162-1169, 2006.

VELLAME, L. M.; OLIVEIRA, A. S. Development and testing of a tension reading system for use with field tensiometers. **Magistra**, Cruz das Almas, v. 17, n. 1, p. 15-22, 2005.

WAUGH, W. J. et al. Small lysimeters for documenting arid site water balance. In: **Proceedings of the ASCE International Symposium on Lysimetry**. July 23-25, 1991.

WEELER, A. J.; GANJI, A. R. **Introduction to engineering experimentation**. New Jersey: Prentice Hall, 1996. 415 p.