

LISÍMETROS DE PESAGEM PARA MEDIDAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM ESTUFA

IZABELA PAIVA MARTINS; ROGÉRIO TEIXEIRA DE FARIA; LUIZ FABIANO PALARETTI; ALEXANDRE BARCELLOS DALRI; CAROLINA OLIVERIO E LUIS GUILHERME POLIZEL LIBARDI

Departamento de Engenharia Rural, Universidade Estadual Paulista - Campus Jaboticabal, Via de Acesso Professor Paulo Donato Castellane, Vila Industrial, Jaboticabal, Sp, Brasil. E-mail: izapmartins@gmail.com, rogeriofaria@fcav.unesp.br, lfpalaretti@fcav.unesp.br, dalri@fcav.unesp.br, carolinaoliverio@hotmail.com, lgplibardi@gmail.com.

1 RESUMO

Lisímetros de pesagem são utilizados com a finalidade de determinar os componentes do balanço hídrico, particularmente a evapotranspiração e a evaporação. Dentre as inúmeras metodologias, esta apresenta maior precisão, porém, para a obtenção de dados confiáveis, sua calibração deve ser executada *in situ*. Esse trabalho objetivou calibrar 12 lisímetros de pesagem, verificar a presença de linearidade e histerese das medidas, e avaliar a precisão dos equipamentos. Os lisímetros apresentavam diâmetro e profundidade de 30 cm, com uma célula de carga em cada lisímetro para a determinação da variação de massa, acoplada a um sistema de aquisição e armazenamento de dados. A calibração foi realizada comparando-se a adição e remoção de pesos com massa conhecida (em kg) com a leitura da célula de carga (em mV). Os dados de calibração foram lineares, apresentando correlação significativa da massa em resposta a voltagem. Os coeficientes angular e linear variaram de 762,78 a 1187,8 kg mV⁻¹ e -444,99 a -798,00 kg, respectivamente. O erro absoluto variou de 0,03 a 0,54, mostrando alta precisão dos lisímetros. A precisão constatada na obtenção da variação da massa foi de 0,79 mm, com o índice de concordância de Willmott foi de 0,99, mostrando a concordância entre os valores estimados e os observados. Conclui-se que os lisímetros são adequados para a determinação da evapotranspiração de cultivo.

Palavras-chave: lisimetria, célula de carga, balanço hídrico

MARTINS, I. P.; FARIA, R. T. de; PALARETTI, L. F.; DALRI, A. B.; OLIVERIO, C.; LIBARDI, L. G. P.
WEIGHING LYSIMETERS FOR GREENHOUSE EVAPOTRANSPIRATION MEASUREMENTS

2 ABSTRACT

Weighing lysimeters are used for the purpose of determining water balance components, especially for evapotranspiration and evaporation. Within all know methods, lysimeter is considered the most accurate, but in order to obtain reliable data, their calibration must be performed *in situ*. The objective of this work was to calibrate 12 lysimeters to verify measurements' linearity and the existence of hysteresis, besides evaluating the equipment's

accuracy. The lysimeters had diameter and depth of 30 cm, with one load cell in each lysimeter for determination of mass variation, connected to a data acquisition and storage system. The calibration was performed by comparing the load and unload know mass (kg) with the load cell reading (mV). The calibration data were linear, presenting a significant mass correlation in response to voltage. The angular and linear coefficients varied from 762.78 to 1187.8 kg mV⁻¹ and -499.99 to -798.00 kg, respectively. The absolute error ranged from 0.03 to 0.54, showing a high accuracy of the lysimeters. The accuracy for mass variation was 0.79 mm and the Willmott concordance index was 0.99, showing the good agreement between the estimated and observed values. It can be concluded that lysimeters are suitable for crop evapotranspiration determination.

Keywords: lisimetry, load cell, water balance

3 INTRODUÇÃO

A determinação da diferença de armazenamento de água no solo, em consequência da entrada e saída de água no sistema, é realizada no método do balanço hídrico. A evapotranspiração é um dos principais componentes do balanço hídrico e corresponde ao total de água perdida pela superfície do solo no processo de evaporação e pelo dossel da planta por meio da transpiração. Dentre os métodos disponíveis que determinam a evapotranspiração e evaporação, a lisimetria de pesagem é considerada o padrão de medida. Lisímetros são tanques preenchidos com solo e apoiado sobre um sistema de pesagem cuja função é a obtenção da variação da massa do sistema e, indiretamente, a evapotranspiração (FARIA; CAMPECHE; CHIBANA, 2006). Aboukhaled, Alfaro e Smith (1982) e Howell, Schneider e Jensen (1991) consideram lisímetros de pesagem como equipamentos mais precisos para medir a evapotranspiração de referência e evapotranspiração de culturas.

Há algumas décadas, a possibilidade de utilização de lisímetros de pesagem era dificultada devido ao alto custo. Com desenvolvimento da eletrônica, tornaram-se disponíveis equipamentos mais precisos e baratos, como as células de carga, bem como sistemas de obtenção e armazenamento de dados mais sofisticados (CAMPECHE, 2002; FARIA CAMPECHE; CHIBANA, 2006).

A calibração dos lisímetros é uma etapa importante e necessária para a obtenção da equação de calibração, sendo esta obtida pela comparação entre a adição e remoção de peso de massa conhecida e o impulso elétrico emitido pelas células de carga. Para garantir a obtenção de uma equação de calibração adequada, esta deve ser feita no local de utilização e também, garantindo o mínimo de interferência externa durante o processo de calibração (PAYERO; IRMAK, 2008). Quando essa calibração é feita de forma incorreta, interpretações inconsistentes dos valores de evapotranspiração são obtidas.

Esse trabalho objetivou calibrar 12 lisímetros de pesagem em condição de campo visando obter a equação de calibração do lisímetro, verificar a presença de linearidade e de histerese das medidas e avaliar a precisão dos equipamentos.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Doze lisímetros de pesagem foram instalados no departamento de Engenharia Rural da UNESP - Jaboticabal, no Setor de Plasticultura, no mês de julho de 2016, localizado nas

coordenadas 21° 14' 25,6'' e 48° 17' 11,3'', com altitude média de 582 m, com clima do tipo Aw, segundo a classificação de Koppen (CEPAGRI, 2016).

Os lisímetros apresentavam 30 cm de diâmetro e 30 cm de profundidade e foram preenchidos com solo até 2 cm da borda. Colocou-se uma manta do tipo 'bidim' no fundo do tanque do lisímetro para prevenir a perda de solo no sistema de drenagem. O solo utilizado, obtido localmente, foi peneirado e colocado em cada lisímetro promovendo-se leve compactação de magnitude semelhante à densidade do solo original. O sistema de drenagem dentro do lisímetro foi construído de brita, areia e terra, colocados em camadas sequenciais totalizando 5 cm. Para escoamento da água de drenagem, uma mangueira foi instalada ao fundo do lisímetro, sendo mantida presa para cima; ao abaixá-la, a água drenada era coletada por uma proveta de 500 mL (Figura 1).

Figura 1. Mangueira de drenagem dos lisímetros.



A massa de cada lisímetro foi registrada por uma célula de carga modelo GL 50 da empresa Alfa Instrumentos Eletrônicos S.A com capacidade de 50 quilogramas e precisão de 0,57 mm. As células de carga dos 12 lisímetros foram conectadas a um sistema de obtenção de dados, constituído de um multiplexador (AM 416 Relay Multiplexer, Campbell Sci., Logan – USA) e um datalogger (CR10X Campbell Sci., Logan – USA). O sistema foi energizado por uma bateria de 12 V ligada a uma placa solar para garantir o suprimento de energia. Com o programa PC200W, os dados armazenados foram transferidos para um módulo de memória, e depois para uma planilha eletrônica em um computador.

A calibração foi realizada conforme metodologia proposta por Campeche (2002), com a superfície dos lisímetros cobertas com plástico para evitar variação de massa por evaporação. Foram realizadas cargas e descargas com sacos de areia de massa conhecida até 25 equivalentes-milímetro. Foram utilizadas massas padrões para representar 1 e 5 equivalente-milímetro de lâmina de água, confeccionados com sacos plásticos preenchidos com areia, fechados hermeticamente e pesados em balança de precisão de 0,01 g. Para se obter 5 equivalentes-milímetro foram utilizados 4 sacos de 0,35 kg, dividindo-se pela área do lisímetro

(0,070686 m²); para 1 equivalente-milímetro foram utilizados 5 sacos de 0,07 kg, dividindo-se pela área do lisímetro, somando um total de 25 mm para cada lisímetro.

As leituras de voltagem tiveram início com os lisímetros descarregados (preenchidos apenas com solo). A seguir, foram acrescentadas e retiradas as massas padrões em intervalo de 2 minutos. A cada 3 segundos foram realizadas leituras, obtendo-se a média a cada 30 segundos, com opção de voltagem de excitação com opção de voltagem de excitação de 7,5 mV e 2.500 mV. A primeira média de leitura para cada massa foi desconsiderada, devido variação de massa que provocaram oscilações. Foram acrescentadas as massas de 5 mm sequencialmente até atingir 20 mm, seguidos de acréscimos de 1 mm até atingir 25 mm. A remoção das massas ocorreu de forma inversa aquela do acréscimo. As leituras foram repetidas 4 vezes, e para o resultado final, foi feito uma média das repetições.

A exatidão dos lisímetros foi determinada pelo erro absoluto (E) (Equação 1), que é a diferença entre os valores de massa estimada em relação a massa observada, pelo coeficiente de determinação (R²), obtido por meio da regressão linear realizada para cada lisímetro, e pelo índice de concordância (d) (Equação 2) proposto por Willmott (1982), sendo que este varia de 0 a 1, e quanto mais próximo o resultado de 1 mais estreita é a relação entre os valores estimados e observados.

$$E = Y_{obs} - Y_{est} \quad (1)$$

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

Em que Y_{obs} são os valores das massas padrão utilizadas para a calibração dos lisímetros; Y_{est} são os valores obtidos na calibração, em resposta à voltagem das células de carga; \bar{Y}_{obs} são os valores médios das massas padrão utilizadas para a calibração dos lisímetros.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados de calibração foram lineares para os 12 lisímetros, mostrando correlação significativa (R² = 0,999) em todos entre massa e voltagem (Tabela 1). A precisão para pesagem de variação de massa pode ser constatada devido à baixa variação do erro absoluto (E), que variou de 0,03 a 0,54 mm, e pelo índice de concordância d, que foi 0,999 para todos os lisímetros. Esses resultados demonstram a alta concordância entre os valores observados e estimados.

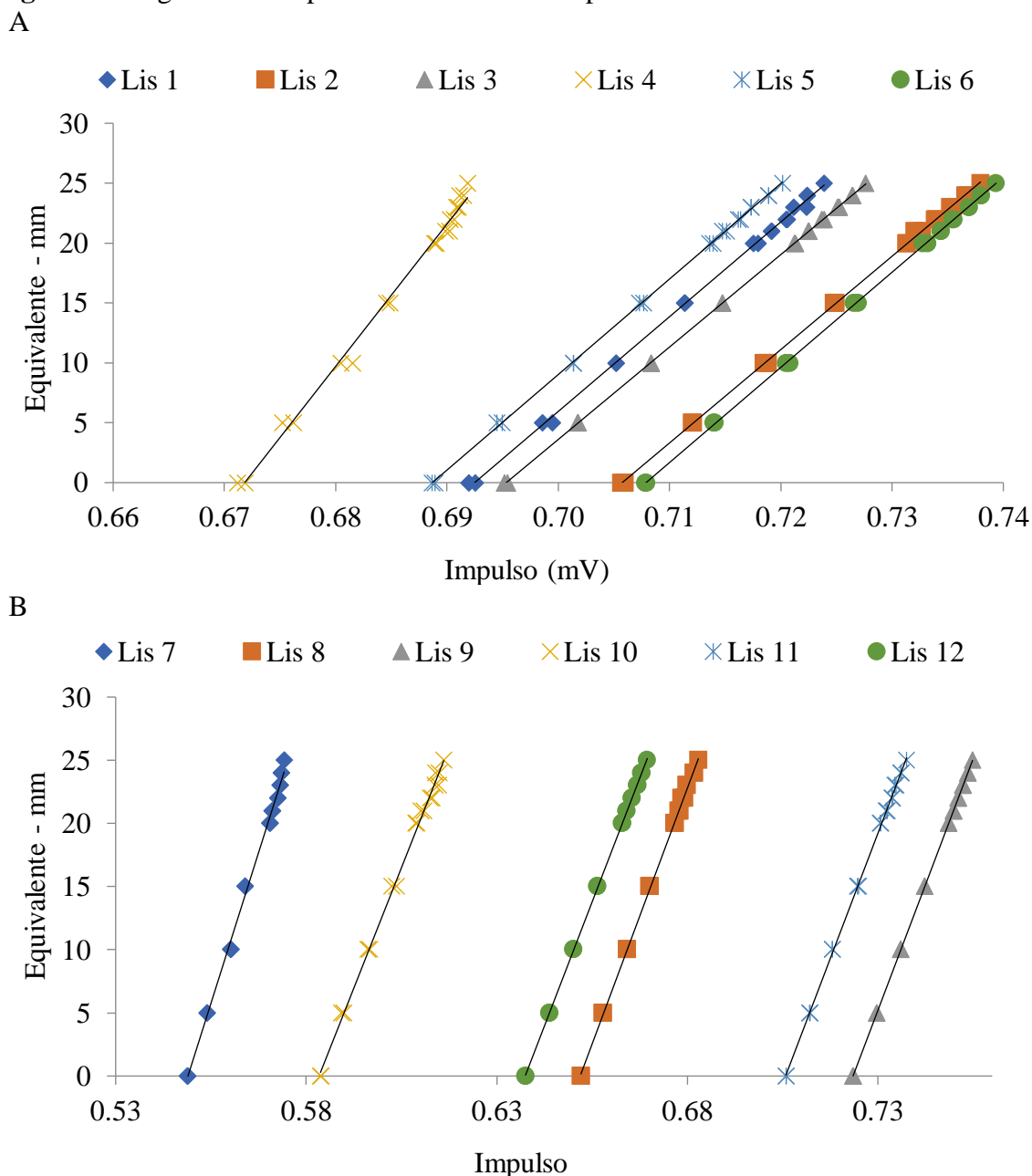
Tabela 1. Coeficientes angular e linear (a e b) da equação do lisímetro*, coeficiente de determinação (R^2), erro absoluto (E) e índice de concordância de Willmott (d).

Lisímetro	a	b	R^2	E (mm)	d
1	790,83	-547,64	0,99	0,21	0,99
2	779,39	-550,05	0,99	0,11	0,99
3	771,66	-536,56	1,00	0,05	0,99
4	1187,80	-798,00	0,99	0,54	0,99
5	797,43	-549,18	0,99	0,13	0,99
6	794,47	-562,39	0,99	0,09	0,99
7	954,39	-523,93	0,99	0,42	0,99
8	810,14	-528,12	0,99	0,18	0,99
9	796,75	-576,45	1,00	0,03	0,99
10	762,78	-444,99	0,99	0,37	0,99
11	793,16	-559,81	0,99	0,14	0,99
12	784,35	-499,99	0,99	0,07	0,99

* $y = a x + b$, sendo y a massa (mm) e x o sinal elétrico (mV)

Os coeficientes angulares e lineares variaram de 762,78 a 1187,8 mm mV^{-1} e -444,99 a -798,00 mm, respectivamente. Segundo Faria, Campeche e Chibana (2006), essas diferenças nos valores podem ocorrer devido às características do extensômetro elétrico de cada célula de carga e mecanismos de transmissão de força para o coeficiente angular, e à massa estática (peso morto), para o coeficiente linear. A similaridade nos valores dos coeficientes angulares dos doze lisímetros indica uniformidade no sistema de pesagem dos mesmos (MARIANO et al., 2015).

O lisímetro 4 foi o que mostrou menor precisão para determinação de variações de massa, dado seu erro absoluto de 0,54 mm, porém esse valor não interferiu na sua capacidade de monitorar dados. Os demais lisímetros mostraram leituras exatas, sendo o lisímetro 9 o de maior exatidão ($E = 0,03$ mm) e precisão ($R^2 = 0,99$). Esses resultados revelam que as equações de regressão são adequadas e os lisímetros não apresentam histerese (Figura 2).

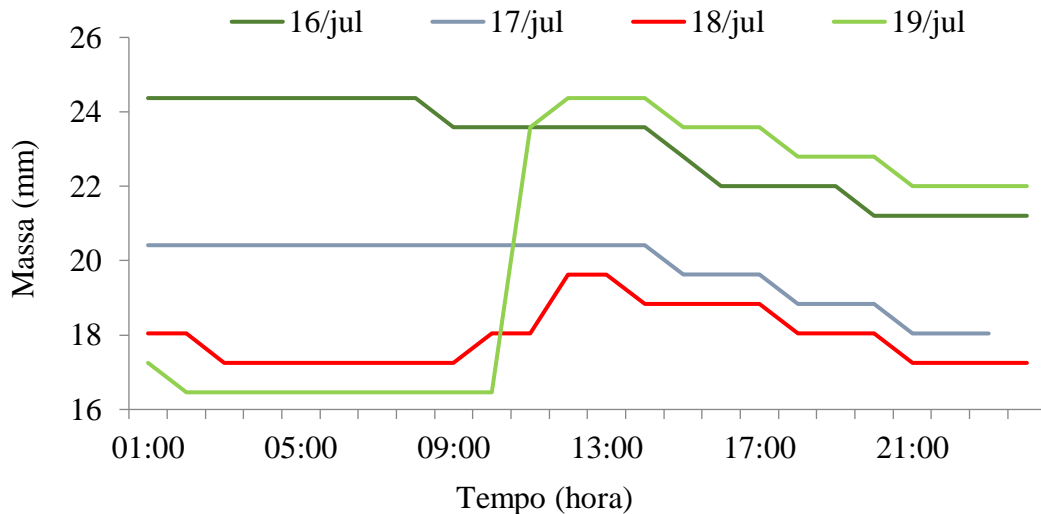
Figura 2. Diagrama de dispersão entre massa e impulso elétrico medidas nos lisímetros.

Faria, Campeche e Chibana (2006), Campeche et al. (2011) e Mariano et al. (2015), também obtiveram linearidades e altas correlações nas variações de massa em resposta à voltagem. Em pesquisa realizada por Santos et al. (2008), os dados da calibração foram semelhantes em todos os lisímetros, mostrando que estes foram adequados para a obtenção da evapotranspiração de referência.

Para demonstrar a capacidade dos lisímetros em monitorar a evaporação e evapotranspiração, apresenta-se na Figura 3 a variação horária da massa em um dos lisímetros durante 4 dias do mês de julho de 2016. Nesse período não foi realizada drenagem, sendo que a variação ocorrida se deu somente pela evaporação do solo (totalmente descoberto), que foi de 3,16, 2,37, 0,79 e 3,16 mm, para os respectivos dias. No terceiro e quarto dia foram realizadas

irrigações de 2,37 e 7,91 mm, respectivamente. Nota-se que a variação das medidas ocorre a cada 0,79 mm evaporado, sendo esta a precisão da célula de carga.

Figura 3. Variação horária de massa de um lisímetro de 16 a 19 de julho de 2016.



Resultados semelhantes foram obtidos por Faria, Campeche e Chibana (2006), Campeche et al. (2011) e Mariano et al. (2015), que ao realizarem calibrações e testes em lisímetros, puderam também observar a capacidade de monitoramento de lisímetros de pesagem.

6 CONCLUSÕES

A calibração dos lisímetros apresentou linearidade e alta correlação da massa em resposta à voltagem medida no sistema de pesagem. Os sistemas testados foram considerados precisos, com coeficientes de determinação superiores a 0,99, e acurados, com valores de erro absoluto inferior a 0,54 mm. Os valores do índice de concordância mostraram-se elevados entre os dados estimados e observados, com precisão em campo de 0,79 mm, sendo os lisímetros habilitados para a determinação de evapotranspiração de cultivo.

7 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro no projeto n. 456791/2014-0.

8 REFERÊNCIAS

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

CAMPECHE, L. F. S. M. **Construção, calibração e análise de funcionamento de lisímetros de pesagem para determinação da evapotranspiração da cultura da lima ácida "Tahiti" (*Citrus latifolia* Tan.)**. 2002. 67 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

CAMPECHE, L. F. S. M.; NETTO, A. O. A.; SOUSA, I. F.; FACCIOLI, G. G.; SILVA, V. P. R.; AZEVEDO, P. V. Lisímetro de pesagem de grande porte. Parte I: Desenvolvimento e calibração. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 5, p. 519-525, 2011.

CEPAGRI. Clima dos municípios paulistas. Campinas, 2016. Disponível em: <http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_279.html>. Acesso em: 18 dez. 2016.

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. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662006000100035>. Acesso em: 07 set. 2016.

HOWELL, T.; SCHNEIDER, A. D.; JENSEN, M. E. History of lysimeter design and use for evapotranspiration measurements. In: Proceeding of the International Symposium on Lysimetry, 1991, Honolulu, HI, **Lysimeters for Evapotranspiration and Environmental Measurements**, New York, Ed. ASCE, Jul 1, 1991, p. 1-9.

MARIANO, D. C.; FARIA, R. T.; FREITAS, P. S. L.; LENA, B. P.; JOHANN, A. L. Construction and calibration of a bar weighing lysimeter. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 37, n. 3, p. 271-278, 2015. Disponível em: <http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciAgron/article/view/19368/pdf_61>. Acesso em: 10 set. 2016.

PAYERO, J. O.; IRMAK, S. Construction, installation, and performance of two repacked weighing lysimeters. **Irrigation Science**, Nebraska, v. 26, p. 191-202, 2008. DOI: 10.1007/s00271-007-0085-9.

SANTOS, F. X.; RODRIGUES, J. J. V.; MONTENEGRO, A. A. A.; MOURA, R. F. Desempenho de lisímetro de pesagem hidráulica de baixo custo no semi-árido nordestino. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, p. 115-124, 2008. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162008000100012>. Acesso em: 26 ago. 2016.

WILLMOTT, C. J. Some comments on evaluation of model performance. **Bulletin American Meteorological Society**, Boston, MA, v. 63, n. 11, Nov. 1982. Disponível em: <http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0477%281982%29063%3C1309%3ASCOTEO%3E2.0.CO%3B2>. Acesso em: 05 set. 2016.