

## DESEMPENHO DE UM LISÍMETRO DE PESAGEM HIDRÁULICA COM DIFERENTES SISTEMAS DE LEITURA

ANTÔNIO HENRIQUE CARDOSO DO NASCIMENTO<sup>1</sup>; SUZANA MARIA GICO LIMA MONTENEGRO<sup>2</sup>; JOÃO AUDIFAX CÉSAR DE ALBUQUERQUE FILHO<sup>3</sup>; ÊNIO FARIAS DE FRANÇA E SILVA<sup>3</sup> E NADIELAN DA SILVA LIMA<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Unidade Acadêmica de Serra Talhada – UAST. Avenida Gregório Ferraz Nogueira, S/N Bairro: José Tomé de Souza Ramos CEP: 56909-535 - Serra Talhada / PE. E-mail: tonyagronomia@gmail.com

<sup>2</sup>Departamento de Engenharia Civil/UFPE, Av. Acadêmico Hélio Ramos, s/n. Cidade Universitária. CEP 50.740-530. Recife, PE. Fone: (81) 2126 7216. E-mail: suzanam@ufpe.br

<sup>3</sup>Departamento de Engenharia Agrícola/UFRPE. R. Dom Manoel de Medeiros, s/n, Dois Irmãos, CEP 52.171-900, Recife, PE. Fone: (81) 3320-6264. E-mails: jaudifax@dtr.ufrpe.br; enio.silva@pq.cnpq.br; nadielanlima@hotmail.com

### 1 RESUMO

A lisimetria de pesagem é reconhecidamente a melhor técnica para determinar a evapotranspiração das culturas, sendo adotada como metodologia padrão para servir de referência na avaliação de outros métodos e para calibrar modelos de estimativa da evapotranspiração em diferentes culturas. Neste sentido, objetivou-se com o trabalho analisar o desempenho de lisímetro de pesagem hidráulica por meio de calibrações ao longo de um ano e através de estimativas de erros de medidas utilizando dois sistemas de pesagem: um sistema automatizado e o outro com sistema de leitura manual. O trabalho foi conduzido em Recife, no campus da Universidade Federal Rural de Pernambuco, no litoral de Pernambuco. A metodologia empregada na instalação e na calibração do lisímetro foi adequada, com coeficiente de determinação de 0,99 na equação de calibração. A relação entre a variação de massa e resposta na voltagem da célula de carga e/ou leitura no manômetro do lisímetro é descrita adequadamente por modelo linear com mínima histerese. O lisímetro de pesagem hidráulica, independente do sistema de leitura, obteve excelente estabilidade, sensibilidade, resolução e exatidão, ao longo de um ano, detectando variações de massa devido à chuva, irrigações e evapotranspiração nos momentos de calibração e durante o ano, mostrando-se adequado para a estimativa de demanda hídrica.

**Palavras-chave:** evapotranspiração de referência, leitura manual, leitura automática.

NASCIMENTO, A. H. C; MONTENEGRO, S. M. G. L.; ALBUQUERQUE FILHO, J. A. C.; SILVA, E. F. F.; LIMA, N. S.  
ANNUAL PERFORMANCE OF A WEIGHING LYSIMETER HYDRAULIC SYSTEMS WITH DIFFERENT READING

### 2 ABSTRACT

The weighing lysimeter is recognized as the best technique to estimate evapotranspiration of crops, being adopted as standard reference method in the evaluation of other methods and to

calibrate models to estimate evapotranspiration from different crops. In this sense, the objective of the present work is to analyze lysimeter performance through calibrations over a year and through estimates of measurement errors using hydraulic weighing lysimeters with two weighing systems: an automated system and another system with manual reading. The work was conducted in Recife, in the Federal Rural University of Pernambuco ( 8°01'05" south latitude, 34°56'48" west longitude, at an altitude of 6,4m).The methodology used in the lysimeter installation and calibration was adequate, resulting in a coefficient of determination of 0.99 in the calibration equation. The relationship between weight change and response to the load voltage and / or reading on the lysimeter cell gauge is adequately described by a linear model with minimal hysteresis. The hydraulic weighing lysimeter, independent of the reading system showed excellent stability, sensitivity , resolution and accuracy over a year having detected variations in mass due to rain, irrigation and evapotranspiration , being suitable for the estimation of water demand.

**Keywords:** reference evapotranspiration, manual reading, automatic reading.

### 3 INTRODUÇÃO

A lisimetria é reconhecidamente a melhor técnica para se determinar a evapotranspiração das culturas. Adotada como metodologia padrão serve de referência na avaliação de outros métodos e para calibrar e validar modelos de estimativa da evapotranspiração de diferentes culturas (FLUMIGNAN, 2011).

Os lisímetros de pesagem são equipamentos precisos devido ao grande aparato tecnológico, verificados principalmente naqueles equipados eletronicamente que, dependendo do modelo, tornam-se, em alguns casos, economicamente inacessíveis para uso em muitos projetos de pesquisa que demandem dados diários. Entretanto, a utilização de lisímetros com sistema de pesagem hidráulica tem sido uma alternativa viável, uma vez que seus custos monetários são menores do que os com pesagem eletrônica, pode-se armazenar e processar os dados como nos lisímetros de pesagem eletrônicas, além de oferecer uma resolução de leitura satisfatória, podendo detectar valores de lâmina evapotranspirada de 0,50 mm (LIMA et al. 2013).

O desenvolvimento e montagem de lisímetros de pesagem com os mais variados tipos, tamanhos e materiais tem sido reportado em estudos na área de manejo da irrigação, hidrologia e, principalmente, a micrometeorologia. Na literatura, (CAMPECHE et al., 2011; REICHARDT; TIMM, 2012; NASCIMENTO et al., 2011), não se encontra referência a um lisímetro padrão, com tamanho, forma, diâmetro ou massa pré-estabelecida. Assim, uma análise crítica de lisímetros dos mais variados tamanhos e mecanismos de pesagem deve ser realizada para que os erros possam ser conhecidos e quantificados, garantindo a qualidade dos dados de evapotranspiração.

Algo importante antes do funcionamento de lisímetros de pesagem em campo é a calibração, fundamental ao estabelecer uma relação entre o sinal de saída da célula de carga (geralmente expresso em mV) e a massa do sistema, além de verificar a linearidade e histerese da célula de carga.

Como existem muitas fontes potenciais de erros inerentes à metodologia, é importante saber quando confiar e duvidar dos dados obtidos nos lisímetros. Os erros relacionados ao sistema de pesagem podem estar associados às células de carga, aos cabos, ao sistema de coleta de dados e a própria estrutura a ser pesada. E estes, somente podem ser devidamente avaliados

após a realização da calibração, testes e ajustamentos das observações (NASCIMENTO et al. 2015).

Sendo assim, para estudar o consumo hídrico de uma cultura, torna-se conveniente promover alguns testes, antes e durante a utilização dos lisímetros de pesagem, com o intuito de conhecer melhor o equipamento, fornecendo dados confiáveis em curtos intervalos de tempo. Este procedimento aumenta o poder de decisão sobre quais dados são úteis e quais devem ser corrigidos ou excluídos.

Desta forma, objetiva-se com este trabalho analisar o desempenho do lisímetro de pesagem hidráulica com sistema de leitura automatizada e manual por meio de calibrações e estimativas de erros de medidas durante o período de março de 2013 a fevereiro de 2014 no litoral do Estado de Pernambuco.

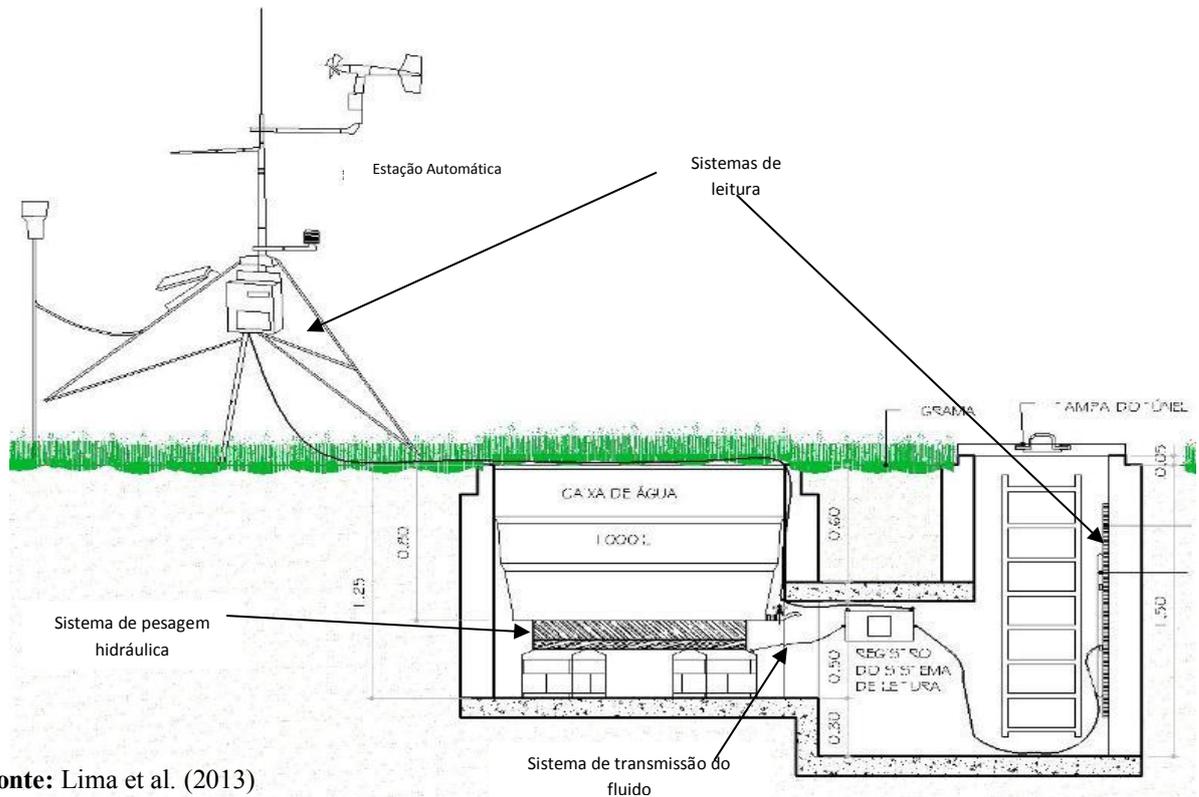
#### 4 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi conduzido em Recife, no campus da Universidade Federal Rural de Pernambuco (8°01'05"S, 34°56'48W, com altitude de 6,4m), situado na região litorânea do estado (ALBUQUERQUE FILHO et al., 2009).

A área experimental possui dimensões totais de 255,6 m<sup>2</sup>, coberta com grama do tipo batatais (*Paspalum notatum*), uma estação agrometeorológica, composta por uma estação agroclimática automática (Campbell Scientific modelo CR1000/CFM100/OS100, com sensores de medição de chuva, de temperatura e umidade relativa do ar, de velocidade e direção do vento, sensores de radiação solar e um microprocessador eletrônico tipo datalogger, alimentado por uma bateria de 12 V, carregada com um painel solar), um tanque Classe A e um lisímetro de pesagem hidráulica com dois sistemas de leituras: um sistema automatizado, em que as leituras são processadas e armazenadas no processador e o outro sistema de leitura manual em uma régua graduada no manômetro com pistão de mercúrio (Figura 1).

O lisímetro de pesagem hidráulica com sistema manométrico foi escolhido como o padrão, sendo constituído de um reservatório em fibra de vidro com área superficial de 1,32 m<sup>2</sup>, profundidade de 0,80 m e volume de 1 m<sup>3</sup> (caixa d'água). Foi construída uma parede externa em alvenaria para sustentação do solo circundante denominado de reservatório externo. Uma abertura para um túnel de acesso foi construída para possibilitar a verificação da água drenada, sistema de leitura e células de carga hidráulicas, viabilizando manutenções ocasionais. O conjunto lisimétrico constitui-se dos seguintes componentes: sistema de drenagem, sistema de pesagem hidráulica, sistema transmissor de pressão e sistema de leitura conforme a Figura 1.

**Figura 1.** Vista lateral do lisímetro de pesagem hidráulica com seus componentes principais.



Fonte: Lima et al. (2013)

Pelo fato do projeto inicial desenvolvido por Lima et al. (2013) ter apresentado algumas falhas como alagamentos do reservatório externo e rupturas na caixa interna, realizou-se algumas modificações, como a construção de um sistema de drenagem para o reservatório externo e adição de uma chapa metálica sobre o sistema de pesagem para que houvesse uma melhor distribuição da massa lisimétrica, pela maior superfície de contato (Figura 2).

**Figura 2.** Modificações no projeto inicial do lisímetro de pesagem.



A avaliação do desempenho do lisímetro de pesagem hidráulica foi efetuada em quatro processos de calibração que ocorreram a cada três meses (março, junho, setembro e dezembro de 2013). Durante a condução do ensaio, conforme metodologia apresentada por Campeche (2002), Oliveira et al. (2008) e Lima et al. (2013) e através da determinação dos erros de medidas, que são utilizados para qualificar os dados em análise, dentre eles: exatidão, precisão, sensibilidade e resolução (CAMPECHE, 2002). No entanto, para este tipo de lisímetro, deve-se também levar em consideração a estabilidade do equipamento (NASCIMENTO et al. 2015).

O processo de calibração foi dividido em duas etapas. A primeira etapa ocorreu no centro do lisímetro, em que foram adicionados e retirados 50 sacos de brita nº 1, hermeticamente fechados, com uma massa padrão de 1,32 Kg, representando 1,0 mm de lâmina evapotranspirada, totalizando um acréscimo de 50 mm de equivalente de água e a cada adição e retirada dos pesos esperava-se dois minutos para estabilização do sistema de leitura. Na segunda etapa ocorreu o mesmo procedimento, só que a superfície do lisímetro foi dividida em quatro quadrantes, onde foram adicionados e retirados 25 pesos padrão, totalizando um acréscimo de 25 mm de lâmina. Esta última etapa foi realizada com o intuito de verificar a estabilidade do equipamento com a determinação do erro médio posicional em relação ao centro e assim obtiveram-se coeficientes de calibração em cada lado e no centro (Figura 3).

**Figura 3.** Detalhes da calibração no setor central e nos quadrantes pela adição e retirada de pesos padrão.



Conforme indicam Flumignan (2011), Schmidt et al. (2013), Lima et al. (2013), a calibração foi realizada em campo, e para evitar as mudanças de massa do sistema devido à evaporação da água do solo, o lisímetro foi coberto com lona plástica. Inicialmente, foi registrada a média de milivoltagem do sistema de leitura sem os pesos padrões.

Para determinação dos erros de medida foi necessário inicialmente à calibração do lisímetro com os dois sistemas de leitura, inicialmente com sistema manual e posteriormente com o automatizado. Obtidos os 50 pares de pontos no setor central e 25 pares de pontos em

cada quadrante para ambos. Confeccionaram-se as curvas de calibração através da regressão linear simples e correlação, sendo avaliada posteriormente a linearidade, acurácia, sensibilidade, exatidão e estabilidade.

Assim, a exatidão dos equipamentos foi determinada por meio do erro padrão, que foi a dispersão por regressão linear simples calculada para cada uma das quatro calibrações, conforme metodologia apresentada por Campeche et al. (2011) e Nascimento et al. (2011). A precisão foi determinada por meio de variações de massa de água que foram comprovadas pelos valores de erro absoluto.

A resolução é inerente ao conjunto célula de carga hidráulica-datalogger e/ou célula de carga hidráulica-manômetro, sendo a menor escala da divisão ou o último dígito que pode ser lido pelo equipamento de medição. Assim, a resolução que é a aptidão de um instrumento de medição de distinguir valores muito próximos da grandeza a medir, no caso do referido lisímetro foi determinada pelo menor valor de ETo registrado através da diferença de leituras diárias do manômetro e no transdutor de pressão durante o processo de calibração, ou seja, é a razão entre o menor valor de leitura obtido durante as diferentes calibrações pelos seus respectivos fatores de conversões, conforme Lima (2012).

A sensibilidade foi obtida pela observação da menor variação do sinal elétrico emitido, e/ou menor variação observada na régua do manômetro, quando detectada uma mudança de massa do equipamento, determinada a partir dos dados plotados numa planilha eletrônica.

A estabilidade do lisímetro foi determinada através da análise do erro médio posicional que é uma medida obtida através da comparação da média dos coeficientes de calibração dos quadrantes e do coeficiente de calibração obtido no centro do equipamento.

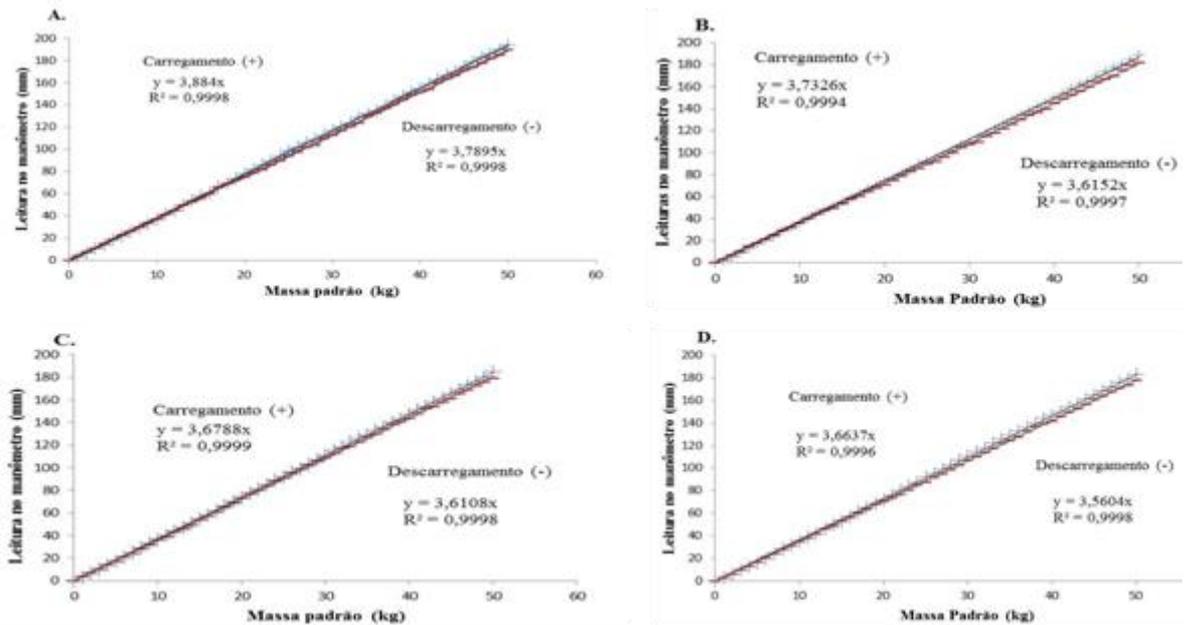
## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das quatro calibrações realizadas em campo ao longo do ano demonstram que a correlação entre a massa padrão e as leituras no manômetro de mercúrio em milímetro (mm) e do transdutor de pressão em milivoltagem (mV) apresentaram respostas lineares ( $R^2 > 0,99$ ) no carregamento e descarregamento em cada um dos 4 (quatro) setores e no centro do lisímetro, conforme Figuras 4 e 5, respectivamente.

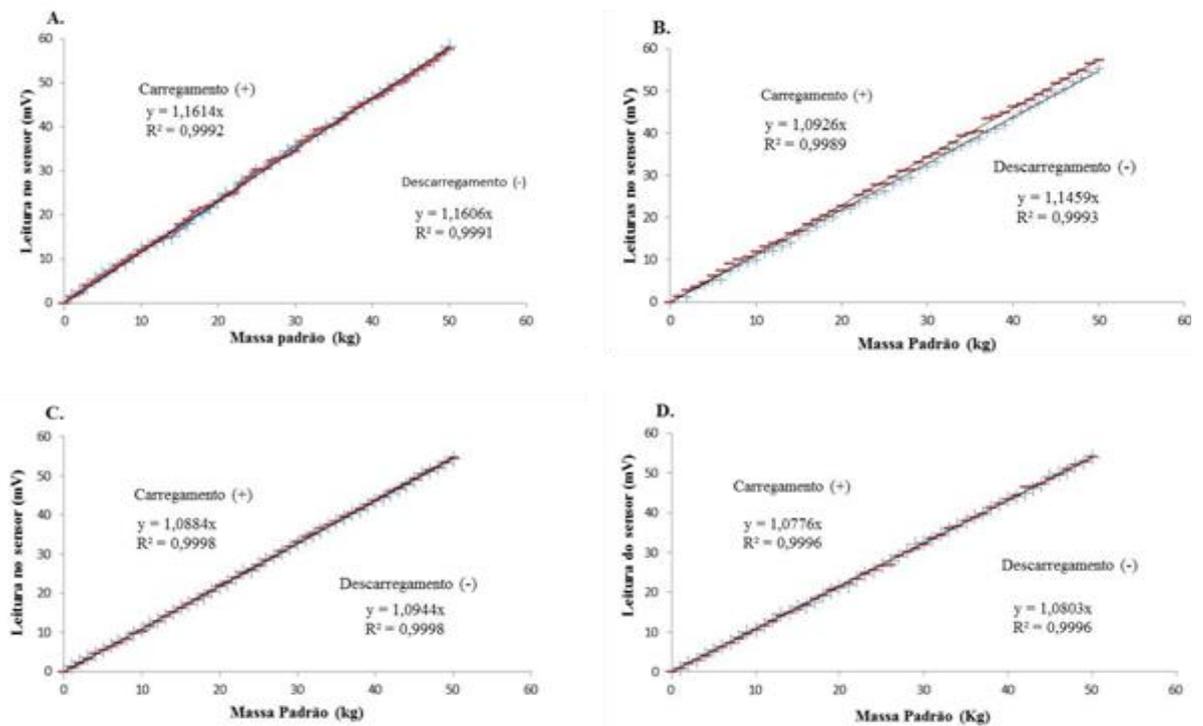
A linearidade dos dados verificada nas quatro calibrações ao longo do ano confirma que a área de contato de todo sistema de pesagem (travesseiros hidráulicos, perfis metálicos e chapa de ferro) permaneceu constante à adição e retirada das massas.

Segundo Gommola (2000), considerando-se que a célula de carga é fabricada para variar linearmente o seu sinal com a massa a qual é submetida, assume-se que a calibração realizada para uma determinada faixa seja válida para toda a faixa de trabalho da célula de carga.

**Figura 4.** Curvas de calibração entre as leituras observadas no manômetro e massas padrão adicionadas (+) e retiradas (-) no centro do lisímetro para primeira calibração (A), segunda calibração (B), terceira calibração (C) e quarta calibração (D).



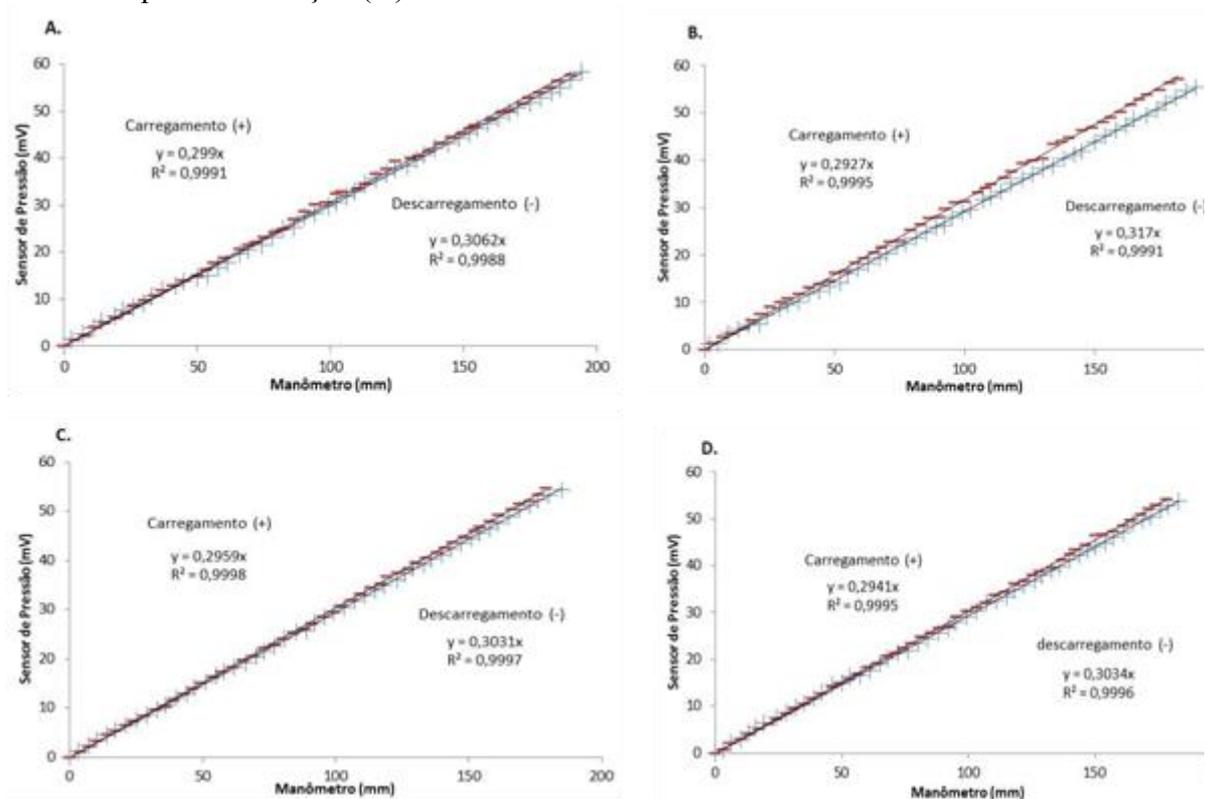
**Figura 5.** Curvas de calibração entre as leituras observadas no transdutor de pressão e massas padrão adicionadas (+) e retiradas (-) no centro do lisímetro para primeira calibração (A), segunda calibração (B), terceira calibração (C) e quarta calibração (D).



Os resultados dos ensaios das diferentes calibrações realizadas durante o período analisado permitiram obter a relação entre os valores obtidos pelo manômetro e transdutor de

pressão, para o setor central do lisímetro de pesagem (Figura 6). Logo, verifica-se que a regressão linear descreve adequadamente a relação entre a variação dos dados dos dois sistemas de leitura. Observa-se também que o elevado coeficiente de determinação ( $R^2 > 0,99$ ) demonstra que as medidas se ajustam a uma reta linear das variáveis estudadas. Lima et al. (2013) encontraram coeficientes de determinação similares ao presente estudo e alta correlação ( $r > 0,99$ ), quando compararam as leituras visuais no manômetro e respostas obtidas com o transdutor de pressão.

**Figura 6.** Relação entre as leituras do transdutor de pressão e do manômetro do mercúrio para carregamento e descarregamento das massas padrão, no setor central do lisímetro para primeira calibração (A), segunda calibração (B), terceira calibração (C) e quarta calibração (D).



Verifica-se na Tabela 1 o resumo dos coeficientes de calibração do centro e dos quadrantes do lisímetro obtidos com leituras visuais no manômetro. Esses valores correspondem à média dos coeficientes angulares das regressões lineares obtidos pelas diferentes calibrações ao longo do ano pelo processo de carregamento e descarregamento do equipamento. A média dos coeficientes de calibração nos quadrantes variou de 3,64 a 3,85  $\text{mm kg}^{-1}$  ou 0,27 a 0,25  $\text{kg mm}^{-1}$  ao longo do ano, enquanto que a média dos coeficientes de calibração no centro variou de 3,61 a 3,84  $\text{mm kg}^{-1}$  ou 0,27 a 0,26  $\text{kg mm}^{-1}$ , ou seja, a variação de 1 mm de leitura no manômetro correspondeu à adição ou retirada de 0,26 litros de água para primeira calibração e de 0,27 litros de água para demais calibrações.

**Tabela 1.** Resumo dos coeficientes de calibração (k) e erro médio posicional do lisímetro de pesagem hidráulica ajustados para os dois ciclos de variação de massa lida no manômetro.

Quadrante do Lisímetro	Coeficiente de calibração (k) do manômetro ( $\text{mm kg}^{-1}$ )			
	1 <sup>a</sup> Calibração	2 <sup>a</sup> Calibração	3 <sup>a</sup> Calibração	4 <sup>a</sup> Calibração
1	3,60	4,22	4,16	4,13
2	4,31	3,61	3,52	3,50
3	3,39	3,35	3,29	3,17
4	4,11	3,80	3,80	3,76
Média dos quadrantes	3,85	3,74	3,69	3,64
Centro do lisímetro	3,84	3,67	3,64	3,61
Erro posicional médio (%)	0,26	1,92	1,33	0,76

Na Tabela 2 observa-se o resumo dos coeficientes de calibração do centro e dos quadrantes do lisímetro obtidos com o transdutor de pressão. Esses valores correspondem à média dos coeficientes angulares das regressões lineares obtidos pelas diferentes calibrações ao longo do ano pelo processo de carregamento e descarregamento do equipamento. A média dos coeficientes de calibração nos quadrantes variou de 1,11 a 1,20  $\text{mV kg}^{-1}$  ou 0,90 a 0,83  $\text{kg mV}^{-1}$  ao longo do ano, enquanto que a média dos coeficientes de calibração no centro variou de 1,08 a 1,16  $\text{mm kg}^{-1}$  ou 0,92 a 0,86  $\text{kg mV}^{-1}$ , ou seja, a variação de 1 mm de leitura no transdutor de pressão correspondeu a adição ou retirada de 0,86; 0,89; 0,91 e 0,92 litros de água para primeira, segunda terceira e quarta calibrações respectivamente.

Observando os resultados, constata-se que o sistema manual manteve a sua perda de água praticamente constante ao longo das avaliações, enquanto que no sistema automatizado constatou-se uma maior perda de água no decorrer das calibrações, demonstrando uma queda de rendimento do transdutor de pressão ao longo do período analisado.

**Tabela 2.** Resumo dos coeficientes de calibração (k) e erro médio posicional do lisímetro de pesagem hidráulica ajustados para os dois ciclos de variação de massa lida no transdutor de pressão.

Quadrante do Lisímetro	Coeficiente de calibração (k) do transdutor de pressão ( $\text{mV kg}^{-1}$ )			
	1 <sup>a</sup> Calibração	2 <sup>a</sup> Calibração	3 <sup>a</sup> Calibração	4 <sup>a</sup> Calibração
1°	1,16	1,30	1,29	1,24
2°	1,31	1,06	1,10	1,07
3°	1,07	1,02	1,02	0,97
4°	1,24	1,23	1,20	1,17
Média dos quadrantes	1,20	1,15	1,15	1,11
Centro do lisímetro	1,16	1,12	1,09	1,08
Erro posicional médio (%)	3,01	3,11	5,70	3,13

Verifica-se nas Tabelas 1 e 2 que a estabilidade do lisímetro foi determinada através da análise do erro médio posicional, medida obtida através da comparação da média dos coeficientes de calibração dos quadrantes e do coeficiente de calibração obtido no centro do equipamento. Foi verificada uma variação de 0,26 a 1,33% do erro médio posicional para o manômetro e de 3,01 a 5,70% para o transdutor de pressão ao longo do ano. Esses valores são

compatíveis com os valores obtidos por os lisímetros construídos por Oliveira (2007) e Lima (2012) com erro médio posicional de 2,31 % e 1,73%, respectivamente.

Possivelmente o menor erro médio posicional obtido, principalmente quando se compara com os valores obtidos pelo Oliveira et al. (2008) e Lima et al. (2013), justifica-se pelo fato de se utilizar um sistema de pesagem com mangueiras rígidas com engate rápido, bem como uma chapa de ferro sob a caixa interna do lisímetro o que possibilitou uma maior superfície de contato e melhor distribuição da massa, proporcionando assim uma maior estabilidade.

Oliveira et al.(2008) e Lima et al.(2013) determinaram como limite tolerável até 10% de erro posicional. O referido limite percentual de erro posicional exclui a possibilidade de tendência à inclinação do tanque e, desta forma, atesta também a impossibilidade de não uniformidade do fluido nas câmaras hidráulicas e, conseqüentemente erros de leituras lisimétricas. Assim, é fundamental um limite inferior a 10% de erro posicional.

Já a resolução é a aptidão de um instrumento de medição de distinguir valores muito próximos da grandeza a medir. No caso do referido lisímetro, a resolução corresponde ao menor valor de ETO registrado através da diferença de leituras diárias do manômetro e no transdutor de pressão.

Verifica-se nas Tabelas 3 e 4 o resumo dos menores valores de leitura, fator de conversão e resolução observadas no manômetro e no transdutor de pressão. Constata-se que o transdutor de pressão apresentou menores resoluções (0,12 a 0,19 mm), no entanto, com uma variação de 36%, ao longo do ano. Já o manômetro, apesar de apresentar maiores valores de resolução (0,19 a 0,20 mm), constatou-se apenas uma variação de 5% ao longo do ano. A resolução manométrica e do transdutor de pressão do lisímetro deste ensaio é compatível com as encontradas por Oliveira (2007) e Lima (2012), respectivamente de 0,15 e 0,13 mm.

**Tabela 3.** Resumo dos menores valores de leitura, fator de conversão e resolução observadas no manômetro.

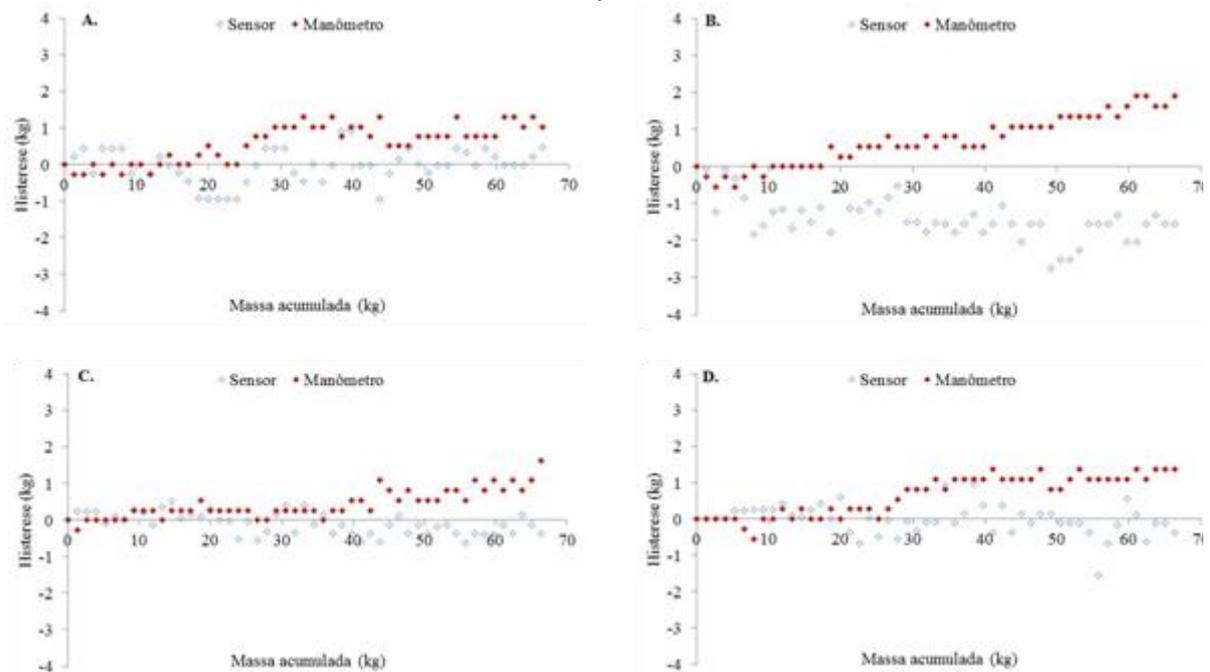
Variáveis	Calibrações do manômetro ao longo do ano			
	1 <sup>a</sup> Calibração	2 <sup>a</sup> Calibração	3 <sup>a</sup> Calibração	4 <sup>a</sup> Calibração
Menor valor de leitura na régua inclinada (mm)	2	2	2	2
Menor valor de leitura convertido (mm)	1	1	1	1
Fator de conversão (mm)	5,10	4,87	4,83	4,79
Resolução do manômetro (mm)	0,196	0,205	0,207	0,209

**Tabela 4.** Resumo dos menores valores de leitura, fator de conversão de resolução observada no Transdutor de pressão.

Variáveis	Calibrações do Transdutor de pressão ao longo do ano			
	1 <sup>a</sup> Calibração	2 <sup>a</sup> Calibração	3 <sup>a</sup> Calibração	4 <sup>a</sup> Calibração
Menor valor de leitura (mV)	0,26	0,19	0,27	0,28
Fator de conversão (mm)	1,54	1,49	1,45	1,43
Resolução do manômetro (mm)	0,169	0,128	0,187	0,195

Observa-se na Figura 7, que tanto o manômetro como o transdutor de pressão apresentaram desvios entre os pontos obtidos nas etapas de carregamento e descarregamento, e que esses desvios entre os pontos obtidos nas etapas de carregamento e descarregamento indicam a existência de histerese. Para as leituras realizadas no manômetro de mercúrio, as massas-padrão determinadas no manômetro de mercúrio e as massas-padrão determinadas no descarregamento foram em média 0,599, 0,707, 0,444, 0,681 kg, que corresponde a 0,451, 0,533, 0,335 e 0,513 mm para a primeira, segunda, terceira e quarta calibração, respectivamente. Acredita-se que a menor histerese seja explicada pela adição de uma chapa de ferro sob a caixa interna do lisímetro, o que pode ter proporcionado uma maior superfície de contato, resultando em uma maior estabilidade do equipamento e consequentemente em uma menor histerese.

**Figura 7.** Histerese apresentada pela variação de massa de carregamento e descarregamento no manômetro e transdutor de pressão durante as quatro calibrações realizadas no centro do lisímetro durante um ano de avaliação.



Analisando a mesma Figura 07, observa-se que as leituras obtidas pelo transdutor de pressão hidrostática, também apresentaram baixa histerese, sendo as massas de descarregamento, em média 0,030; 1,429; 0,091 e 0,013, maiores que aquelas determinadas no carregamento. Os resultados desta pesquisa obtidos com transdutor de pressão diferem dos dados obtidos por Flumignam (2011) e Lima et al. (2013) que observaram valores maiores dos desvios no sentido de carregamento para a célula de carga do lisímetro de pesagem.

Os valores de histerese observados tanto no manômetro, quanto no transdutor de pressão, próximos a origem, podem estar associados ao intervalo de leitura entre carregamento e descarregamento das massas padrão, que foi de dois minutos (CAMPECHE, 2002). Este intervalo é suficiente para que os dois sistemas de leitura possam estabilizar e assim diminuir os erros de histerese.

A Tabela 5 apresenta os valores de acurácia do lisímetro de pesagem determinados por diferentes sistemas de leituras. A exatidão dos equipamentos foi determinada por meio do erro

padrão, que foi a dispersão por regressão linear simples calculada para cada uma das quatro calibrações dos valores de massa mensurados pelos lisímetros da primeira etapa (central) com o sistema de leitura manométrico e com o transdutor de pressão em relação aos valores das massas padrões (sacos de brita), conforme metodologia apresentada por Campeche (2002), Campeche et al. (2011) e Nascimento et al. (2011).

**Tabela 5.** Valores de Acurácia do lisímetro de pesagem determinados por diferentes sistemas de leituras.

Sistema de Leitura	Valores da acurácia do Lisímetro (mm)			
	1ª Calibração	2ª Calibração	3ª Calibração	4ª Calibração
Manométrico	0,25	0,32	0,20	0,29
Transdutor de Pressão	0,53	0,53	0,25	0,37

Os valores da acurácia do lisímetro de pesagem hidráulica, com sistema de leitura manométrica variaram de 0,20 a 0,32 mm, tendo um valor médio de 0,26 mm, o que equivale a uma massa de 0,07 kg, enquanto que os valores da acurácia do lisímetro de pesagem hidráulica com sistema de leitura com o transdutor de pressão variaram de 0,25 a 0,53 mm, tendo um valor médio de 0,42 mm, o que equivale a uma massa de 0,38 kg. Os valores de acurácia no lisímetro de pesagem independente de sistema de leitura foram inferiores aos encontrados por Nascimento et al. (2011), que variaram de 0,4 a 1 mm e superiores aos valores encontrados por Campeche et al. (2011), de 0,08 mm e Campeche (2002), que variaram de 0,02 a 0,1 mm, utilizando a mesma metodologia empregada no presente estudo.

## 6 CONCLUSÕES

O lisímetro de pesagem hidráulica independente do sistema de leitura apresentou excelente estabilidade, sensibilidade, resolução e exatidão, ao longo de um ano, detectando variações de massa devido à evapotranspiração, mostrando-se adequados para o estudo da demanda hídrica.

## 7 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à UFRPE e UFPE pela colaboração durante a construção do lisímetro, bem como a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de doutorado e pelo apoio financeiro ao primeiro autor, à FINEP/CT- HIDRO no âmbito do projeto REHIDRO 1830, e ao CNPq pelas bolsas PQ.

## 8 REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE FILHO, J. A. C.; LIMA, V. L. A.; MENEZES, D.; AZEVEDO, C. A. V.; DANTAS NETO, J.; SILVA JÚNIOR, J. G. Características vegetativas do coentro submetido a doses do polímero hidroabsorvente e lâminas de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.13, p.671-679, 2009.

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 Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

CAMPECHE, L. F. S. M.; AGUIAR NETTO, A. O.; 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.

FLUMIGNAN, D. L. **Lisímetros de pesagem direta para o estudo do consumo hídrico do pinhão manso (*Jatropha curcas* L.)**. 2011. 202 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

GOMMOLA, G. **The application and installation of load cells**. Frankfurt: Zarbock, 2000. 178 p.

LIMA, N. S. **Construção, instalação e calibração de lisímetros para a determinação da evapotranspiração de referência na região do litoral de Pernambuco**. 2012. 57 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2012.

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

NASCIMENTO, A. H. C.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; OLIVEIRA, A. L. Desempenho anual de Lisímetro com diferentes sistemas de leitura. In: **CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, XXV**, São Cristóvão, 08 a 13 de novembro de 2015. 172p. Anais eletrônicos. Disponível em: <http://www.abid.org.br/cd-xxv-conird/pdf/029.pdf>

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

OLIVEIRA, L. M. M. **Avaliação da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) na bacia experimental do riacho Gameleira – PE, utilizando lisímetro de pesagem hidráulica e métodos indiretos**. 2007. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

OLIVEIRA, L. M. M.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; AZEVEDO, J. R. G.; SANTOS, F. X. Evapotranspiração de referência na bacia experimental do riacho Gameleira, PE, utilizando-se lisímetro e métodos indiretos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v.3, n.1, p.58-67, 2008.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**, 2. ed. Barueri: Manole, 2012. 500 p.

SCHMIDT, C. D. S.; PEREIRA, F. A. C.; OLIVEIRA, A. S.; GOMES, J. F.; VELLAME, L. M. Design, installation and calibration of a weighing lysimeter for crop evapotranspiration studies. **Water Resources and Irrigation Management**, Cruz das Almas, v.2, n.2, p. 77-85, 2013.