

Leidjane M. M. de Oliveira<sup>2</sup>Suzana M. G. L. Montenegro<sup>3</sup>José Roberto G. de Azevedo<sup>3</sup>Francisco X. dos Santos<sup>4</sup>

# Evapotranspiração de referência na bacia experimental do riacho Gameleira, PE, utilizando-se lisímetro e métodos indiretos<sup>1</sup>

## RESUMO

A estimativa da evapotranspiração é de extrema importância para determinação do balanço hídrico, especialmente em áreas agrícolas irrigadas, com impacto direto no manejo de irrigação das culturas. Objetivou-se por este trabalho, avaliar a evapotranspiração de referência (ET<sub>0</sub>) na bacia experimental do riacho Gameleira, PE, utilizando-se lisímetro de pesagem hidráulica e métodos indiretos. O lisímetro possuía área superficial de 1,52 m<sup>2</sup>, profundidade de 0,80 m e relação entre áreas de borda e superfície, de 18%. Testes apontaram resolução de 0,1543 mm de ET<sub>0</sub>, erro médio posicional de 2,31% e calibrações com coeficientes de determinação superiores a 0,9993. Adotando o lisímetro como padrão, testaram-se, nas escalas diária e pentadial, os métodos do Tanque Classe A, Camargo, Makkink, Radiação Solar, Jensen-Haise, Hargreaves-Samani, Blaney-Criddle, Penman e Penman-Monteith. Os métodos de Jensen-Haise e Tanque Classe A superestimaram os valores da ET<sub>0</sub> comparados ao lisímetro. A ET<sub>0</sub> estimada pelo método da Radiação Solar foi o que mais se ajustou aos valores obtidos no lisímetro.

**Palavras-chave:** lisimetria, pesagem hidráulica, balanço hídrico

## Reference evapotranspiration in the experimental basin of Gameleira, PE, using lysimeter and indirect methods

## ABSTRACT

The estimate of the evapotranspiration is very important for the determination of the water balance, especially in agricultural areas under irrigation, with direct impact on the irrigation management. This paper evaluates the reference evapotranspiration (ET<sub>0</sub>) in the experimental basin of the Gameleira rivulet – PE, using an hydraulic weighing lysimeter and indirect methods. The lysimeter has a surface area of 1.52 m<sup>2</sup>, depth of 0.80 m and ratio of border and surface area of 18%. Tests presented resolution of 0.1543 mm of ET<sub>0</sub>, average positional error of 2.31% and calibration with coefficients of determination higher than 0.9993. The statistic analysis was performed in daily and five days time scales between the lysimeter (standard) and the indirect methods: Class A pan, Camargo, Makkink, Solar Radiation, Jensen-Haise, Hargreaves-Samani, Blaney-Criddle, Penman and Penman-Monteith. The methods of Jensen-Haise and Class A pan overestimated the values of the ET<sub>0</sub> compared to the lysimeter. The ET<sub>0</sub> estimated by the Solar Radiation method had the best performance in relation to the lysimeter values.

**Key words:** lysimetry, hydraulic weighing, water balance

<sup>2</sup> UFRPE, Bolsista DTI/CNPq, Dept<sup>o</sup> de Engenharia Civil, Fone: (81) 2126.7216, Fax: (81) 2126.7216, leidjaneoliveira@uol.com.br

<sup>3</sup> UFRPE, Professores, Dept<sup>o</sup> de Engenharia Civil, Fone: (81) 2126.8709, Fax: (81) 2126.7216, suzanam@ufrpe.br, jrga@ufrpe.br

<sup>4</sup> UFRPE, Doutorando-PPGCS, Departamento de Agronomia, Fone: (81)3320-6220, Fax: (81) 3320-6220, franciscoxaviersantos@hotmail.com

<sup>1</sup> Extraído da Dissertação de Mestrado do primeiro autor, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRPE

## INTRODUÇÃO

A evapotranspiração é a ocorrência simultânea da evaporação da água do solo e da transpiração da água através da planta e considerada como uma parcela de água cedida à atmosfera, sendo o principal componente de saída do balanço hídrico.

O Boletim nº 56 de Allen *et al.* (1998) da Food and Agricultural Organization (FAO) define a evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) como sendo a evapotranspiração de uma cultura hipotética, com altura fixa de 0,12m, albedo igual a 0,23 e resistência da cultura ao transporte de vapor d'água igual a 70 s m<sup>-1</sup>. A cultura hipotética está relacionada a uma superfície gramada, de altura uniforme, em crescimento ativo, cobrindo totalmente a superfície do solo e sem restrição hídrica.

Em análise quantitativa, a evapotranspiração tem sua determinação baseada em métodos diretos (lisímetros) e métodos indiretos. Os métodos mais empregados na estimativa da ET<sub>o</sub> são os indiretos e se baseiam em dados meteorológicos, muitas vezes não disponíveis próximo ao local de estudo. Por outro lado, os métodos diretos de estimativa, como os lisímetros de pesagem, que proporcionam resultados mais confiáveis, são utilizados apenas para finalidades científicas, tendo em vista a necessidade de implantação de uma estrutura física onerosa (Carvalho *et al.*, 2006).

Machado & Mattos (2001) ressaltaram que os lisímetros são peças fundamentais na determinação da evapotranspiração pois, além de permitirem a sua determinação direta, servem de instrumento de calibração para os métodos empíricos.

No Brasil, o pioneiro em lisímetro de pesagem hidráulica com pistão de mercúrio foi Rodrigues (1987), para estudo de ET<sub>o</sub>, em Parnamirim, Pernambuco. Outras pesquisas com lisímetros similares foram desenvolvidas, juntamente com a Universidade Federal Rural de Pernambuco, em Serra Talhada, por Freitas (1994); em Petrolina, por Costa (1999); Silva (2000) e Silva *et al.* (2003), em Recife, por Santos *et al.* (2003), em Pesqueira, por Santos (2004) e Santos *et al.* (2005), em Piracibá pela ESALQ - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", por Silva (2005) e pela Universidade Federal de Pernambuco por Oliveira *et al.* (2006) e Oliveira (2007).

Objetivou-se, por este trabalho, avaliar a evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) na bacia experimental do riacho Gameleira, em Pernambuco, utilizando-se lisímetro de pesagem hidráulica com pistão de mercúrio, comparando-o com métodos indiretos.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Área de estudo

A pesquisa foi desenvolvida na bacia experimental do riacho Gameleira, na cidade de Vitória de Santo Antão, Pernambuco, distante 50 km do Recife. Trata-se de uma sub-bacia do rio Tapacurá, localizada na parte Nordeste da Mesorregião Geográfica do Agreste do Estado de Pernambuco, nas coordenadas UTM 245.186 E; 9.108,157 N; 248.694 E e 9.103,632 N no meridiano central 25, situada em área de transição entre a

zona da mata e o semi-árido. O clima dominante da área é o As', clima quente e úmido do tipo pseudo tropical na classificação de Köppen (Oliveira, 2007). Os solos são predominantemente do tipo argissolo, associados a solos neossolo e argissolo (EMBRAPA, 1999).

### Lisímetro de pesagem hidráulica

O lisímetro foi instalado ao lado das estações meteorológicas automática e convencional da Escola Agrotécnica Federal de Vitória de Santo Antão (EAFVSA), em uma área plana de 216m<sup>2</sup> totalmente coberta com grama inglesa (*Stenotaphrum secundatum* L).

O lisímetro instalado é do tipo pesagem hidráulica com pistão de mercúrio, área superficial de 1,52 m<sup>2</sup> e profundidade de 0,80 m. Completo detalhamento sobre o processo construtivo de cada etapa, tanto em área coberta como em campo, se encontra em Oliveira *et al.* (2006) e Oliveira (2007). A Figura 1 apresenta o lisímetro com todos os componentes testados antes de serem instalados no campo.



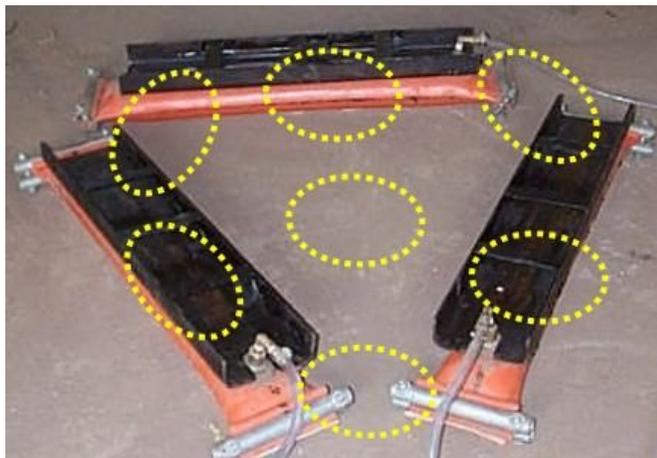
Figura 1. Componentes do lisímetro de pesagem hidráulica em fase de teste no laboratório

Figure 1. Components of hydraulic weighing lysimeter during the laboratory test phase

A determinação do volume ideal do fluido nas células hidráulicas, conforme Silva (2000), possibilitou que a área de contato entre as células de carga hidráulica e a base de apoio fosse suficiente para registrar valores altamente correlacionados aos volumes acumulados.

Para verificação da estabilidade do experimento através da determinação do erro médio posicional, realizaram-se calibrações em 7 setores (laterais e central) do lisímetro. Assim, foram obtidos coeficientes em cada célula de carga hidráulica, entre as mesmas e no centro, conforme Figura 2.

O coeficiente de calibração (*k*) é a razão entre a diferença da leitura (mm) no manômetro e a massa de carregamento ou descarregamento no tanque, expresso por milímetros de lâmina de água. A calibração foi feita no lisímetro, tanto em área

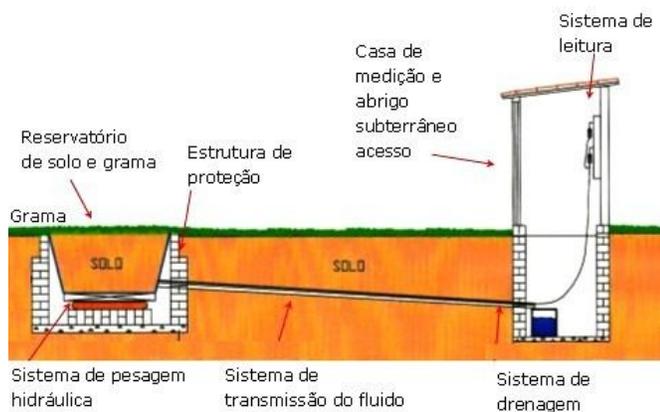


**Figura 2.** Setores (laterais e central) de calibração do lisímetro

**Figure 2.** Sectors (laterals and central) of the lysimeter calibration

coberta (laboratório) como em campo, sendo a análise estatística por regressão linear simples e correlação.

A Figura 3 apresenta o corte esquemático do lisímetro em campo, compreendendo a estrutura de proteção, o reservatório de solo e grama, o sistema de pesagem hidráulica, o sistema de transmissão de fluido, o sistema de drenagem e o sistema de leitura.



**Figura 3.** Corte esquemático do lisímetro em campo

**Figure 3.** Cross section of the lysimeter in field

A Figura 4 mostra a estrutura metálica de apoio que compõe o sistema de pesagem para recebimento do tanque de solo e grama.

### Operação do lisímetro em campo

Após a montagem do lisímetro no campo, o volume ideal do fluido nas células hidráulicas e o coeficiente de calibração definido previamente em laboratório, iniciou-se o monitoramento no dia 15/02/2006, através de leituras diárias sempre realizadas às 8 horas da manhã.

Conforme o balanço hídrico, calculava-se o suprimento hídrico necessário através do monitoramento da precipitação,



**Figura 4.** Detalhe do sistema de pesagem hidráulica: perfis metálicos e estrado metálico em forma de triângulo equilátero para recebimento do tanque de solo e grama

**Figure 4.** Detail of the weighing hydraulic system: profiles and metallic base in form of equilateral triangle for receiving the soil and grass tank

da lâmina drenada e da altura específica da grama; assim, se calculava a ETo, pela Eq.1.

$$ETo(LIS) = \frac{(L_f - L_i)}{f} + P_{(mm)} - L_d - p_g \quad (1)$$

em que:

ETo(LIS) - evapotranspiração de referência pelo lisímetro (mm dia<sup>-1</sup>)

L<sub>f</sub> - leitura final do manômetro no dia anterior após irrigação (mm dia<sup>-1</sup>)

L<sub>i</sub> - leitura inicial do manômetro no dia atual (mm dia<sup>-1</sup>)

f - fator de conversão de mm de leitura para mm de ETo

P<sub>(mm)</sub> - precipitação no período (mm dia<sup>-1</sup>)

L<sub>d</sub> - lâmina drenada (mm dia<sup>-1</sup>)

P<sub>g</sub> - lâmina de água (mm dia<sup>-1</sup>) equivalente à grama cortada (kg)

### Estimativa da evapotranspiração de referência por métodos indiretos

Para a estimativa da ETo foram utilizados 9 métodos indiretos, quer sejam:

#### 1. Método Tanque Classe A – ETo(TQ)

$$ETo(TQ) = K_p \cdot ECA \quad (2)$$

em que:

ETo(TQ) - evapotranspiração de referência pelo Tanque Classe A (mm dia<sup>-1</sup>)

K<sub>p</sub> - coeficiente de tanque igual a 0,75, considerando-se área circundada com gramado, umidade relativa alta (>70%) e velocidade do vento (< 175 km dia<sup>-1</sup>)

ECA - evaporação do Tanque Classe A (mm dia<sup>-1</sup>)

## 2. Método de Camargo – ETo(C)

$$ETo(C) = R_{a(\text{dia})} \cdot T \cdot K_F \quad (3)$$

em que:

ETo(C) - evapotranspiração de referência, por Camargo (mm dia<sup>-1</sup>)

$R_{a(\text{dia})}$  - radiação solar extraterrestre (mm dia<sup>-1</sup>)

T - temperatura média diária do ar (°C)

$K_F$  - fator de ajuste que varia com a temperatura média anual do ar no local do experimento

## 3. Método Makkink – ETo(MK)

$$ETo(MK) = 0,61 \cdot W \cdot R_{s(d)} - 0,12 \quad (4)$$

$$W = 0,483 + 0,01T_{\text{med}} \quad (5)$$

$$T_{\text{med}} = (T_{\text{max}} + T_{\text{min}}) \div 2 \quad (6)$$

em que:

ETo(MK) - evapotranspiração de referência, por Makkink (mm dia<sup>-1</sup>)

$R_{s(d)}$  - radiação solar incidente (mm dia<sup>-1</sup>)

W - fator de ponderação

$T_{\text{med}}$  - temperatura média diária calculada pelas temperaturas máxima e mínima do ar

$T_{\text{max}}$  - temperatura máxima diária do ar (°C)

$T_{\text{min}}$  - temperatura mínima diária do ar (°C)

## 4. Método Radiação Solar-ETo(RAD)

$$ETo(RAD) = c_v \cdot W \cdot R_{s(d)} \quad (7)$$

em que:

ETo(RAD) - evapotranspiração de referência, por Radiação Solar (mm dia<sup>-1</sup>)

$c_v$  - fator de ajuste, em função dos intervalos de velocidade média do vento (m s<sup>-1</sup>) medida a 2 m de altura e intervalos de umidade relativa média (%)

W - fator de ponderação calculado em função da temperatura média diária do ar

$R_{s(d)}$  - radiação solar incidente (mm dia<sup>-1</sup>)

## 5. Método Jensen-Haise-ETo(JH)

$$ETo(JH) = R_{s(d)} \cdot (0,0252T + 0,078) \quad (8)$$

em que:

ETo(JH) - evapotranspiração de referência, por Jensen-Haise (mm dia<sup>-1</sup>)

$R_{s(d)}$  - radiação solar incidente (mm dia<sup>-1</sup>)

T - temperatura média diária do ar (°C)

## 6. Método Hargreaves-Samani-ETo(HS)

$$ETo(HS) = 0,0023 \cdot R_{a(\text{dia})} \cdot (T_{\text{max}} - T_{\text{min}})^{0,5} \cdot (T + 17,8) \quad (9)$$

em que:

ETo(HS) - evapotranspiração de referência, por Hargreaves-Samani (mm dia<sup>-1</sup>)

$R_{a(\text{dia})}$  - radiação solar extraterrestre (mm dia<sup>-1</sup>)

$T_{\text{max}}$  - temperatura máxima diária do ar (°C)

$T_{\text{min}}$  - temperatura mínima diária do ar (°C)

T - Temperatura média diária do ar (°C)

## 7. Método Blaney-Criddle - ETo(BC)

$$ETo(BC) = a + b \cdot [P \cdot (0,46T_{\text{med}} + 8,13)] \quad (10)$$

$$a = 0,0043 \cdot UR_{\text{min}} - \left( \frac{n}{N} \right) - 1,41 \quad (11)$$

$$b = a_0 + a_1 \cdot UR_{\text{min}} + a_2 \cdot \frac{n}{N} + a_3 \cdot U_d + c \quad (12)$$

$$c = a_4 \cdot UR_{\text{min}} \cdot \frac{n}{N} + a_5 \cdot UR_{\text{min}} \cdot U_d \quad (13)$$

em que:

ETo(BC) - evapotranspiração de referência, por Blaney-Criddle (mm dia<sup>-1</sup>)

P - percentagem média diária de horas de luz para diferentes latitudes

$T_{\text{med}}$  - temperatura média diária do ar calculada pelas temperaturas máxima e mínima do ar, conforme (Eq. 6)

a + b - coeficientes regionais de ajuste da equação

$a_0$  - 0,81917

$a_1$  - (-0,0040922)

$a_2$  - 1,0705

$a_3$  - 0,065649

$a_4$  - (-0,0059684)

$a_5$  - (-0,0005967)

$UR_{\text{min}}$  - umidade relativa mínima do ar (%)

n - número de horas reais de insolação (h)

N - fotoperíodo (h)

$U_d$  - velocidade do vento do período diurno a 2 m de altura (m s<sup>-1</sup>)

## 8. Método Penman-ETo(P)

$$ETo(P) = \frac{\left[ \frac{\Delta}{\gamma} \cdot \frac{R_n(\text{mm})}{\lambda(\text{cal})} + E_a \right]}{\frac{\Delta}{\gamma} + 1} \quad (14)$$

em que:

ETo(P) - evapotranspiração de referência, por Penman (mm dia<sup>-1</sup>)

$R_{n(\text{mm})}$  - radiação líquida (mm dia<sup>-1</sup>)

$\lambda(\text{cal})$  - calor latente de vaporização (59 cal cm<sup>-2</sup> mm<sup>-1</sup>)

$E_a$  - poder evaporante do ar (mm dia<sup>-1</sup>)

$\Delta$  – declividade da curva de pressão de vapor na saturação

$\gamma$  – constante psicrométrica (0,66 mb)

### 9. Método Penman-Monteith-ETo(PM)

$$ETo(PM) = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{(T_{med} + 273)} \cdot U_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot U_2)} \quad (15)$$

em que:

ETo(PM) - evapotranspiração de referência, por Penman-Monteith (mm dia<sup>-1</sup>)

$\Delta$  - declividade da curva de pressão de vapor na saturação (kPa °C<sup>-1</sup>)

$R_n$  - radiação líquida (MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>)

$G$  - fluxo de calor no solo (MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>)

$\gamma$  - constante psicrométrica (kPa °C<sup>-1</sup>)

$T_{med}$  – temperatura média diária calculada pelas temperaturas máxima e mínima do ar, conforme (Eq. 6)

$U_2$  - velocidade do vento a 2 metros de altura (m s<sup>-1</sup>)

$e_s$  - pressão de vapor na saturação (kPa)

$e_a$  - pressão de vapor atual (kPa)

### Avaliação dos métodos de estimativa de ETo

Para definição do desempenho dos métodos indiretos com relação ao lisímetro, utilizou-se a regressão linear simples, correlação (r), índice de concordância (d), índice de desempenho (c) e erro padrão da estimativa (SEE).

Conforme Willmott *et al.* (1985), o índice “d” é dado pelas seguintes equações:

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|\hat{y}_i| + |y_i|)^2} \quad (16)$$

$$\hat{y}_i = \hat{y}_i - \bar{y} \quad (17)$$

$$y_i = y_i - \bar{y} \quad (18)$$

em que:

d - índice de concordância, adimensional, variando de 0 a 1

$\hat{y}_i$  - ETo estimada pelo método indireto

$y_i$  - ETo medida pelo lisímetro

$\bar{y}$  - média dos valores medidos no lisímetro

O coeficiente de correlação (r) foi definido através da seguinte equação:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n X_i Y_i - \frac{\left(\sum_{i=1}^n X_i\right) \left(\sum_{i=1}^n Y_i\right)}{N}}{\sqrt{\left[ \sum_{i=1}^n X_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n X_i\right)^2}{n} \right] \left[ \sum_{i=1}^n Y_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n Y_i\right)^2}{n} \right]}} \quad (19)$$

em que

r – coeficiente de correlação

$X_i$  - ETo medida pelo lisímetro

$Y_i$  - ETo estimada pelo método indireto

O índice (c) proposto por Camargo & Sentelhas (1997) para indicar o desempenho dos métodos, reúne os coeficientes de correlação (r) e o de concordância (d), conforme a Tabela 1 e a seguinte equação:

$$c = r \cdot d \quad (20)$$

em que:

c - índice “c” desempenho

d - índice de concordância, adimensional, variando de 0 a 1

**Tabela 1.** Critério de interpretação do desempenho dos métodos de estimativa da ETo pelo índice “c” de Camargo & Sentelhas (1997)

**Table 1.** Interpretation criteria of the performance for the estimation methods of the ETo by the “c” index of Camargo and Sentelhas (1997)

Valor de “c”	Desempenho
> 0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito Bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sufrível
0,41 a 0,50	Mau
≤ 0,40	Péssimo

O erro padrão da estimativa (SEE) mede a dispersão dos valores amostrados ao redor da reta de regressão, definido pela expressão:

$$SEE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-1}} \quad (21)$$

em que

SEE - erro padrão da estimativa

$\hat{y}_i$  - ETo medida pelo lisímetro

$y_i$  - ETo estimada pelo método indireto

n - número de observações

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A área superficial do lisímetro, de 1,52 m<sup>2</sup>, foi compatível com os lisímetros construídos por Freitas (1994), Costa (1999), Silva (2000) e Silva (2005) com áreas respectivas de 1,25; 1,79; 1,79 e 1,04 m<sup>2</sup>. Aboukhaled *et al.* (1982) sugerem que, no mínimo, a área superficial seja de 2 m<sup>2</sup> para lisímetros destinados a medir a evapotranspiração de referência; no entanto, parece haver tendência ao emprego de lisímetros com área

inferior à mínima indicada, que se deve a questões financeiras e à praticidade das técnicas construtivas.

O lisímetro apresentou relação entre área de borda e área superficial de 0,18, equiparável aos lisímetros empregados por Freitas (1994), Costa (1999), Silva (2000), Santos (2004) e Silva (2005) com relações de 0,38; 0,48; 0,48; 0,20 e 0,10. Aboukhaled *et al.* (1982) comentam que o espaço que compreende a parede da estrutura de contenção e a folga entre esta e a parede do tanque, pode afetar as leituras lisimétricas. Eles relatam a existência de relações desprezíveis como em lisímetros forrados por plástico, até relações de 0,65, como o grande lisímetro de concreto de Coshocton (EUA). Ressalta-se que quanto maior o valor desta relação maior também a interferência nas leituras lisimétricas, pois a irradiação do calor sensível interfere no balanço vertical de energia.

A Tabela 2 apresenta os resultados das calibrações realizadas em área coberta e em campo. As relações entre a massa padrão e as leituras no manômetro, apresentaram respostas lineares no carregamento e descarregamento em cada um dos 6 setores e no centro do lisímetro, com coeficientes de determinação ( $R^2$ ) entre 0,9990 a 0,9999, compatíveis com resultados de Freitas (1994), Costa (1999), Santos (2004), Silva (2000) e Silva (2005).

**Tabela 2.** Resumo dos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) de carregamento (+) e descarregamento (-) em testes de calibração realizados em área coberta e em campo, para definição do coeficiente final

**Table 2.** Summary of the uploading (+) and downloading (-) determination coefficients ( $R^2$ ) in calibration tests performed both in covered area and under field conditions for the definition of the final coefficient

Setores do Lisímetro	$R^2$		$R^2$	
	carregamentos (+)		descarregamentos (-)	
	Coberta	Campo	Coberta	Campo
Setor 1	0,9998	0,9997	0,9998	0,9997
Setor 2	0,9996	0,9991	0,9999	0,9997
Setor 3	0,9997	0,9995	0,9998	0,9993
Setor 4	0,9995	0,9997	0,9999	0,9997
Setor 5	0,9996	0,9991	0,9998	0,9995
Setor 6	0,9996	0,9990	0,9998	0,9996
Central	0,9997	0,9998	0,9997	0,9999

A calibração é de suma importância ao funcionamento de lisímetros; Bomfim *et al.* (2004) obtiveram em lisímetro de pesagem eletrônica, no município de Limoeiro do Norte, CE, resposta linear com coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,9926 em segunda calibração após dois anos de utilização, comprovando que o equipamento se encontrava apto e capaz de fornecer dados de evapotranspiração condizentes com a região.

A Tabela 3 resume os resultados dos coeficientes de calibração obtidos para os setores. O coeficiente de calibração ( $k$ ) final para o lisímetro (2,13513 mm kg<sup>-1</sup>) proporcionou um erro médio posicional de 2,31%, apresentando compatibilidade com os de Freitas (1994), Costa (1999), Silva (2000) e Santos (2004), respectivamente 4; 3,52; 2,11 e 3,93%. Este resultado permite inferir que o lisímetro apresentou equilíbrio

**Tabela 3.** Resumo dos coeficientes de calibração ( $k$ ) e erro médio posicional resultantes dos testes de calibração em área coberta e campo

**Table 3.** Summary of the calibration coefficients ( $k$ ) and positional average error obtaining in calibration tests performed in laboratory and field conditions

Setores do lisímetro	Coef. de calibração ( $k$ ) (mm kg <sup>-1</sup> )	
	Coberta	Campo
Setor 1	2,16808	2,15161
Setor 2	2,20762	2,06594
Setor 3	2,18126	2,12854
Setor 4	2,17467	2,23398
Setor 5	2,11536	2,25375
Setor 6	2,10548	2,27352
Média dos Setores	2,15874	2,18456
Lisímetro total	2,09230	2,13513
Erro médio posicional	3,17%	2,31%

estável e que para a condição de distribuição assimétrica de carregamento e descarregamento, considerando os limites do teste, o erro médio foi de 2,31%.

A resolução do lisímetro foi de 0,1543 mm de ETo para o campo. Os resultados para equipamentos desta natureza indicam respostas variáveis em função da concepção de projeto, que envolve a diversidade de materiais empregados, bem como suas dimensões e disposição. Lisímetros desenvolvidos por Freitas (1994), Costa (1999), Silva (2000), Santos (2004) e Silva (2005), apresentaram valores respectivos de 0,21; 0,29; 0,1322; 0,108 e 0,245 mm.

### Estimativa da ETo - Análise Estatística

Avaliaram-se 115 observações em escala diária e 23 em pentadial, compreendendo o período de maio de 2006 a fevereiro de 2007. Desconsideram-se os dias com eventos chuvosos de altas intensidades, que impossibilitaram leituras de ETo.

As Tabelas 4 e 5 apresentam os resultados das avaliações estatísticas nas escalas diária e pentadial, respectivamente, tendo como padrão o lisímetro.

**Tabela 4.** Resumo estatístico referente às equações de regressão linear e ao desempenho dos métodos de cálculos da ETo em 115 observações diárias

**Table 4.** Statistics of linear regression equations and the performance of calculations methods of the ETo on 115 daily values

Métodos escala diária	r	SEE mm dia <sup>-1</sup>	Índice "d"	Índice "c"	Desempenho
Radiação Solar	0,84	0,60	0,88	0,74	Bom
Blaney-Cridle	0,79	0,78	0,83	0,66	Bom
Penman-Monteith	0,84	0,84	0,80	0,69	Bom
Penman	0,86	0,94	0,77	0,66	Bom
Hargreaves-Samani	0,83	1,03	0,73	0,61	Mediano
Jensen-Haise	0,83	1,10	0,75	0,62	Mediano
Makkink	0,84	1,42	0,63	0,53	Sofrível
Camargo	0,77	1,45	0,59	0,45	Mau
Tanque Classe A	0,68	1,16	0,73	0,49	Mau

(r) coeficiente de correlação; (SEE) erro padrão da estimativa; (d) índice de concordância; (c) índice de desempenho

**Tabela 5.** Resumo estatístico referente às equações de regressão linear e ao desempenho dos métodos de cálculos da ETo em 23 observações pentadiais

**Table 5.** Statistics of the linear regression equations and the performance of the calculation methods of the ETo on 23 values aggregating a 5 day period each

Métodos escala pentadial	r	SEE mm dia <sup>-1</sup>	Índice "d"	Índice "c"	Desempenho
Radiação Solar	0,90	0,48	0,90	0,81	Muito bom
Hargreaves-Samani	0,93	0,91	0,76	0,70	Bom
Blaney-Criddle	0,81	0,70	0,82	0,67	Bom
Penman	0,90	0,87	0,77	0,69	Bom
Penman-Monteith	0,88	0,76	0,81	0,73	Bom
Jensen-Haise	0,88	1,03	0,72	0,63	Mediano
Tanque Classe A	0,85	0,95	0,76	0,65	Mediano
Makkink	0,89	1,39	0,60	0,53	Sofrível
Camargo	0,88	1,37	0,60	0,53	Sofrível

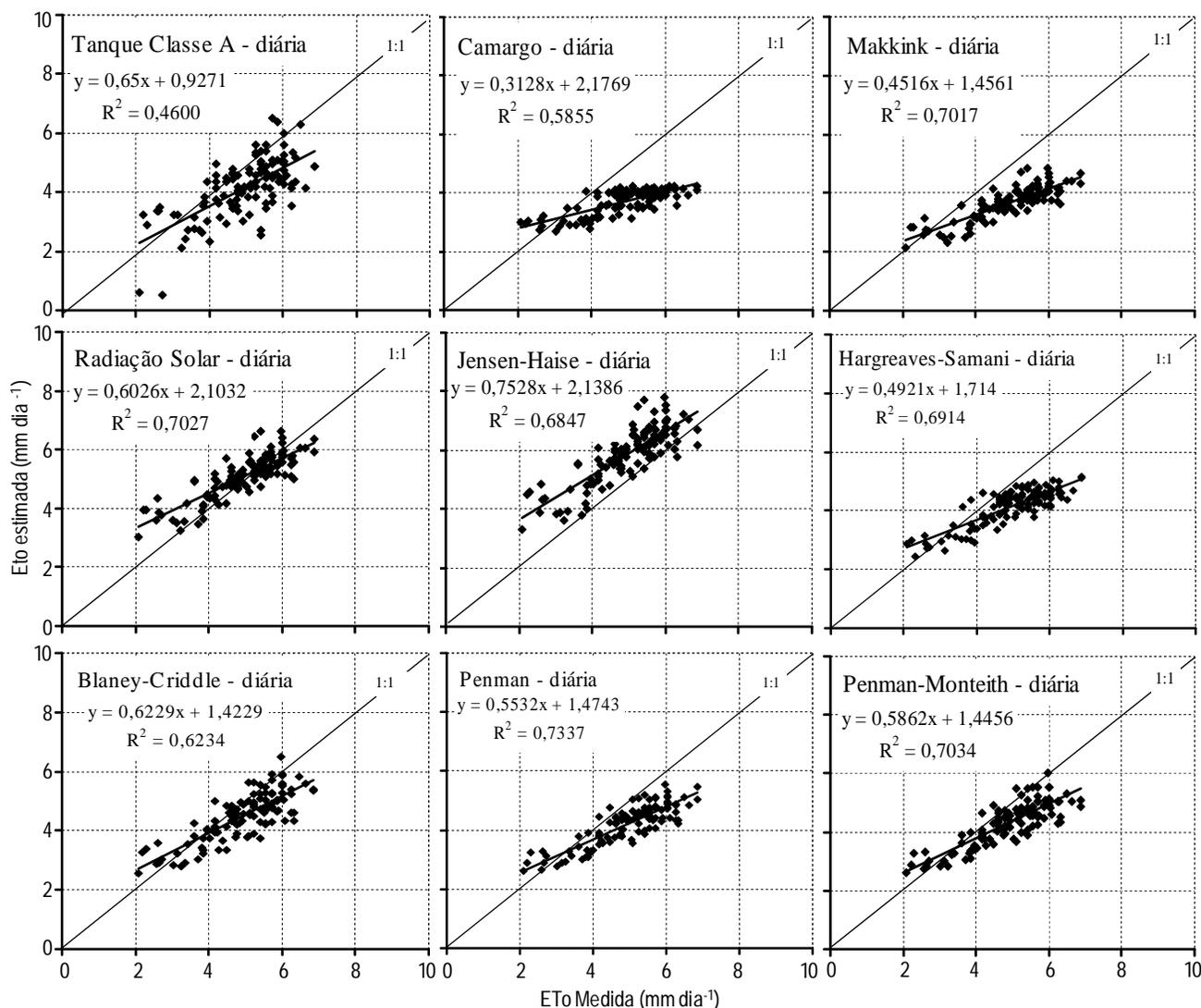
(r) coeficiente de correlação; (SEE) erro padrão da estimativa; (d) índice de concordância; (c) índice de desempenho

Observa-se que os coeficientes de correlação (r), entre cada método e o lisímetro padrão, na escala diária (0,68 a 0,86) são compatíveis com os lisímetros de Costa (1999), Freitas (1999) e Silva (2000) cujas variações foram 0,21 a 0,76; 0,29 a 0,77 e 0,53 a 0,85, respectivamente

Ainda na escala pentadial, conforme Tabela 5, os coeficientes de correlação (r) ficaram com valores na faixa de 0,81 a 0,93, os quais também se apresentaram compatíveis com os valores de Silva (2000) de 0,55 a 0,91.

O erro padrão da estimativa (SEE) na escala diária resultou de 0,60 a 1,45 mm dia<sup>-1</sup> compatível com Silva (2000) de 1,23 a 2,55 mm dia<sup>-1</sup>; já na escala pentadial os valores foram de 0,48 a 1,39 mm dia<sup>-1</sup>, compatíveis com os de Silva (2000) de 0,74 a 2,48 mm dia<sup>-1</sup>.

No que se refere ao desempenho proposto por Camargo & Sentelhas (1997) apresentado na Tabela 1, o método de radiação solar foi o de melhor desempenho na escala diária, sendo considerado "Bom" e, na pentadial, "Muito Bom". Silva (2000) encontrou, para este método, o desempenho "Bom".



**Figura 5.** Correlação linear entre a ETo medida (lisímetro) e estimada pelos métodos indiretos na escala diária

**Figure 5.** Linear correlation between measured ETo (lysimeter) and estimated through indirect methods on a daily scale

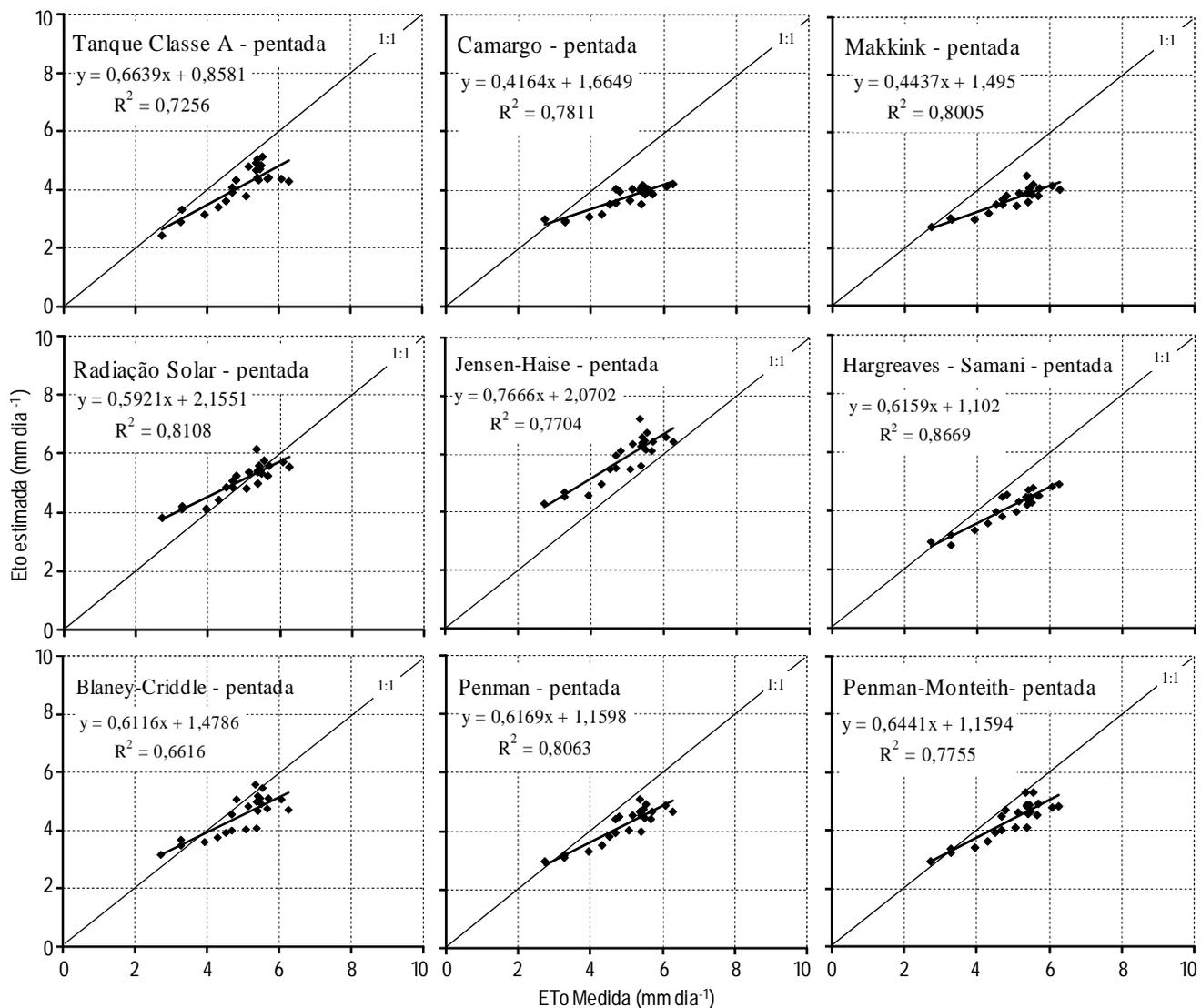


Figura 6. Correlação linear entre a ETo medida (lisímetro) e estimada pelos métodos indiretos na escala pentadial

Figure 6. Linear correlation between measured ETo (lysimeter) and estimated through indirect methods with data aggregated in five day period

O método de Jensen-Haise, tanto na escala diária como na pentadial, apresentou desempenho “Mediano”, não compatível com os resultados de Silva (2000), pois o mesmo apresentou resultado de desempenho “Ótimo”. Jensen *et al.* (1990) apud Silva *et al.* (2003) ressaltaram que, apesar dos autores classificarem em 12º o método de Jensen-Haise entre 20 avaliados em diferentes regiões, trata-se de um método simples que utiliza apenas como variáveis independentes a temperatura média diária e a radiação solar, porém poucos estudos foram realizados com este método, principalmente no Brasil.

O método de Penman-Monteith, considerado a parametrização padrão para o cálculo da ETo apresentou desempenho “Bom” em ambas as escalas. Os resultados apresentados por Silva (2000) estiveram na categoria “Muito Bom”.

Para o Tanque Classe A, se encontrou desempenho “Mau” para escala diária e “Mediano” para escala pentadial. Os resultados de Silva (2000) em ambas as escalas, foi de “Mediano”. Jensen *et al.* (1990) apud Silva *et al.* (2003) ressaltaram

que este método apresenta inconsistência na escala diária, principalmente pela dificuldade de separar eventos de chuva da evaporação durante períodos chuvosos.

As Figuras 5 e 6 apresentam, graficamente, o desempenho dos métodos de estimativas (variável dependente y) da ETo em 115 observações na escala diária e 23 observações na escala pentadial, respectivamente, tendo como padrão o lisímetro (variável independente x).

A Tabela 6 apresenta os valores da ETo acumulada e média diária das 115 observações e desvios em relação ao lisímetro. Observa-se que os métodos de Jensen-Haise e Tanque Classe A superestimaram os valores da ETo comparados com o lisímetro, conforme Figura 7. O método da Radiação Solar foi o que mais se aproximou do lisímetro.

A média da ETo diária do lisímetro localizado em área de transição entre a Zona da Mata e o Semi-Árido nordestino considerando-se as condições edafoclimáticas locais e as observações para o período de estudo, foi de 4,94 mm dia<sup>-1</sup>.

**Tabela 6.** ETo em 115 observações e desvio dos métodos indiretos em relação ao lisímetro

**Table 6.** ETo of 115 values and standard deviation of the indirect methods in relation to the lysimeter

Métodos	ETo média diária (mm dia <sup>-1</sup> )	ETo acumulada (mm)	Desvio em relação ao lisímetro (%)
Radiação Solar	5,08	596,22	4,91
Jensen-Haise	5,86	685,65	20,64
Blaney-Criddle	4,50	517,62	-8,92
Penman Monteith	4,34	499,41	-12,12
Hargreaves-Samani	4,15	476,77	-16,11
Penman	4,21	483,96	-14,84
Camargo	3,72	428,10	-24,67
Makkink	3,69	424,08	-25,38
Tanque Classe A	4,14	695,30	22,34
Lisímetro	4,94	568,22	-

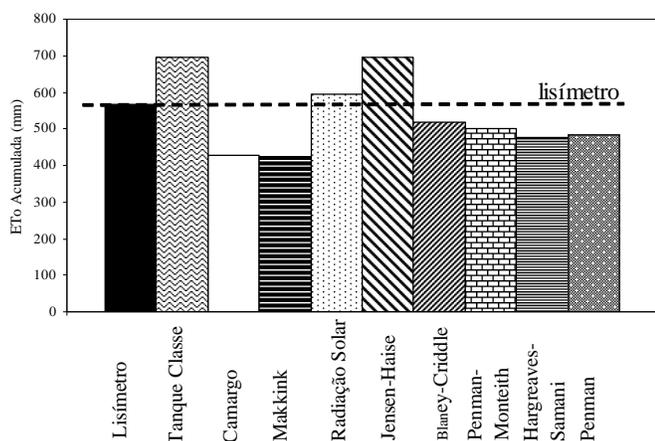


Figura 7. Evapotranspiração de referência (ETo) acumulada do lisímetro e dos métodos indiretos

Figure 7. Accumulated reference evapotranspiration (ETo) for the lysimeter and indirect methods

Santos (2004), com lisímetro de pesagem hidráulica em Pesqueira, PE (transição Agreste-Sertão), encontrou média da ETo diária de 8,09 mm dia<sup>-1</sup>. Silva (2000) realizou estudo de mesma natureza em Petrolina, PE (Sertão) e obteve ETo média diária de 5,92 mm dia<sup>-1</sup>.

## CONCLUSÕES

O lisímetro de pesagem hidráulica apresentou elevada estabilidade, com erro posicional inferior a 3,00% e respostas altamente lineares foram geradas nas calibrações, com coeficientes de correlação superiores a 0,9993.

A precisão de campo foi adequada, com valor de 0,1543 mm, o que possibilita operação em escala diária.

Observa-se que os métodos de Jensen-Haise e Tanque Classe A superestimaram os valores da ETo comparados com o lisímetro.

O método da Radiação Solar foi o que apresentou melhor desempenho em relação ao lisímetro.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à UFPE, UFRPE, à Escola Agrotécnica Federal de Vitória de Santo Antão, pela colaboração técnica durante a construção do lisímetro, e ao CT-HIDRO/CNPq, pela concessão da bolsa de mestrado.

## LITERATURA CITADA

- Aboukhaled, A; Afaro, A; Smith, M. Lysimeters. Rome: FAO. 1982, Irrigation and Drainage. Paper n° 39. 68p.
- Allen, R.G; Pereira, L. S.; Raes, D.; Smith, M. Crop evapotranspiration - guidelines for computing crop water requirements Rome: FAO. 1998 Irrigation and Drainage. Paper 56. 297p.
- Bomfim, G. V.; Azevedo, B. M.; Viana, T. V. A.; Borges, R.L.M; Oliveira, J. J. G. Calibração de um lisímetro de pesagem após dois anos de utilização. Revista Ciência Agronômica, v.35, número especial, p.284-290, 2004.
- Camargo, A.P; Sentelhas, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. Revista Brasileira de Agrometeorologia, v.5, n.1, p. 89-97, 1997.
- Carvalho, D.F.; Silva, L.D.B.; Folegatti, M.V.; Costa, J.R.; Cruz, F.A. Avaliação da evapotranspiração de referência na região de Seropédica - RJ utilizando lisímetro de pesagem. Revista Brasileira de Agrometeorologia, v.14, n.1, p. 97-105, 2006.
- Costa, M.S.V. Determinação da evapotranspiração de referência por evapotranspirômetro de pesagem hidráulica com arranjo de pistão de mercúrio. Recife: Universidade Federal Rural de Pernambuco, 1999. 81p. Dissertação de Mestrado.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de classificação de Solos. EMBRAPA Solos Rio de Janeiro - RJ, 1999, 412p.
- Freitas, J.A.G. Evapotranspirômetro de pesagem por sensor de carga hidráulica: construção, calibração e testes. Recife: Universidade Federal Rural de Pernambuco, 1994. 122p. Dissertação de Mestrado.
- Machado, R.E.; Mattos, A. Construção e instalação de um lisímetro com sistema de drenagem. Revista Brasileira de Agrometeorologia, v.9, n.1, p.147-151, 2001.
- Oliveira, L.M.M. Avaliação da evapotranspiração de referência (ETo) na bacia experimental do riacho Gameleira - PE, utilizando lisímetro de pesagem hidráulica e métodos indiretos. Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 2007. 111p. Dissertação de Mestrado.
- Oliveira, L.M.M.; Montenegro, S.M.G. L.; Montenegro, A.A.A.; Santos, F.X.; Silva, F.B. Instalação e calibração de lisímetro de pesagem hidráulica na bacia experimental do riacho Gameleira - PE. In: Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 8, v. 2, 2006, Gravata. Resumos... Gravata: ABRH, 2006, p.195.

- Rodrigues, J.J.V. Construção e testes preliminares de um evapotranspirômetro de célula de carga hidráulica. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 1, 1987, Campinas. Resumo... Campinas: SBPC, 1987, p.68.
- Santos, F.X. Lisímetro de pesagem hidráulica e evapotranspiração de referência por diversos métodos no Agreste Pernambucano. Recife: Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2004. 74p. Dissertação de Mestrado.
- Santos, F.X.; Montenegro, A.A.A.; Rodrigues, J.J.V. Instalação e calibração de mini-lisímetro de pesagem hidráulica. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 15, v. 2, 2003, Curitiba. Resumos: Curitiba, ABRH, 2003, CD Rom.
- Santos, F.X.; Rodrigues, J.J.V.; Montenegro, A.A.A. Desempenho de lisímetro de pesagem hidráulica no Semi-árido Nordeste. In: XXXIV Congresso Brasileiro de Eng<sup>a</sup> Agrícola, 34, v. 2, 2005, Rio Grande do Sul. Resumos... Rio Grande do Sul: CONBEA, 2005, CD Rom.
- Silva, T.J.A. Aplicação de evapotranspirômetro de pesagem no estudo de relações entre a evapotranspiração de referência medida e estimada no semi-árido Nordeste. Recife: Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2000. 97p. Dissertação de Mestrado.
- Silva, T.J.A. Evapotranspiração e coeficiente de cultivo de maracujazeiros determinados pelo método do Balanço de Radiação e lisimetria de pesagem hidráulica. São Paulo: ESALQ – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - Universidade de São Paulo, 2005. 98p. Tese de Doutorado.
- Silva, T.J.A.; Montenegro, A.A.A.; Rodrigues, J.J.V. Aplicação de lisímetro de pesagem hidráulica na determinação da evapotranspiração de referência, em Petrolina - PE. Engenharia Agrícola, v.23, n.3, p.511-520, 2003.
- Willmott, C.J.; Ckleson, S.G.; Davis, R.E. Statistics for the evaluation and comparison for models. Journal of Geophysical Research, v.90, n. C5, p. 8995-9005, 1985.