

FRANCISCO XAVIER DOS SANTOS

**LISÍMETRO DE PESAGEM HIDRÁULICA E EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE
REFERÊNCIA POR DIFERENTES MÉTODOS NO AGRESTE PERNAMBUCANO**

Recife, 2004

FRANCISCO XAVIER DOS SANTOS

**LISÍMETRO DE PESAGEM HIDRÁULICA E EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE
REFERÊNCIA POR DIFERENTES MÉTODOS NO AGRESTE PERNAMBUCANO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Mestrado em Ciência do Solo da UFRPE, como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Agronomia – Ciência do Solo

Orientador:

José Júlio Vilar Rodrigues, PhD, UFRPE.

Co-orientador:

Abelardo Antônio de Assunção Montenegro, PhD, UFRPE.

Conselheiro:

Ronaldo Freire de Moura, Doutor, UFRPE.

Recife, 2004

Catologação na Fonte
Setor de Processos Técnicos da Biblioteca Central – UFRPE

S2371 Santos, Francisco Xavier dos

Lisímetro de pesagem hidráulica e evapotranspiração de referência por diferentes métodos no agreste pernambucano/ Francisco Xavier dos Santos- 2004.

77f.: il.

Orientador: José Júlio Vilar Rodrigues
Dissertação (Mestrado em Agronomia) –
Universidade Federal Rural de Pernambuco. Departamento de Agronomia
Inclui bibliografia e anexo.

CDD 627.52

1. Lisímetro
2. Métodos agrometeorológico
3. Evapotranspiração de referência

- I. Rodrigues, José Júlio Vilar
- II. Título.

DEDICATÓRIA

À AMARO JOSÉ DOS SANTOS (*In memoriam*)

VALDECI, minha mãe.

BETÂNIA, MARINÊZ, MÔNICA e NENA, minhas irmãs.

CARLOS e GUSTAVO, meus irmãos.

Pensar é o trabalho mais difícil que há, e talvez, seja esta a razão para tão poucos se dedicarem a isso.

Henry Ford.

Aquele que habita o esconderijo do Senhor, à sombra do onipotente descansará.

Salmo 93

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, Senhor e Criador de todas as coisas, pelas bênçãos que tem me dado ao longo de minha vida.

Ao meu orientador, Professor José Júlio Vilar, pela competente orientação e ao meu co-orientador, professor Abelardo Antônio de Assunção Montenegro, pela parceria na elaboração deste trabalho.

A Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, representada na pessoa do Professor Fernando José Freire, pela oportunidade de ingresso no Mestrado; A FINEP/ REHISA pela colaboração financeira.

Aos colegas de curso Edilene, Fábio, Benjamin, Josânjela e Danilo, pelos bons momentos dentro e fora de sala de aula, e em particular ao meu amigo Samuel Belo Venâncio Gomes.

Aos estagiários do Laboratório de Física do Solo - João Aparecido e Breno Siqueira -, pelo trabalho conjunto na produção de artigos científicos e ao laboratorista José Anacleto, tricolor de coração.

Aos estagiários da área de Recursos Hídricos: Manoel Costa, Tiago, Júlio, Júnior e Lenildo pelo apoio nas calibrações de campo, em especial a Thais Emanuelle Monteiro dos Santos, pelo companheirismo, pelo incentivo, pela confiança que tem me depositado e pela pessoa que ela representou para mim.

Ao meu colega Ítalo Willian, pelo tempo de convivência durante a graduação (casa de estudante 1) e pós-graduação; aos funcionários da Coordenação da Pós-Graduação: Noca, Socorro e Josué, pelo apoio e amizade; a Vivaldo, pela realização das leituras lisimétricas, sem as quais este trabalho não cumpriria seu objetivo.

Para não pecar por alguma omissão, deixo aqui a minha mais profunda gratidão a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para este feito.

SUMÁRIO

| | Pág. |
|--|------|
| AGRADECIMENTOS | v |
| RESUMO | xiii |
| ABSTRACT | ix |
| 1. INTRODUÇÃO | 10 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 12 |
| 2.2 Evapotranspiração como um processo biofísico | 12 |
| 2.3 Conceitos de evapotranspiração | 13 |
| 2.4 Lisímetros para determinação da evapotranspiração de referência (ET _o) | 14 |
| 2.4.1 Fatores que afetam as medições lisimétricas | 16 |
| 2.5 Equações de estimativa da evapotranspiração de referência | 18 |
| 2.6 Tanque evaporimétrico | 20 |
| 2.7 Métodos de estimativa da evapotranspiração em trabalhos relevantes na Fazenda Nossa Senhora do Rosário | 20 |
| 3. MATERIAL E MÉTODOS | 21 |
| 3.1 Descrição local | 21 |
| 3.2 Propriedades e características físicas do solo | 22 |
| 3.3 Descrição do lisímetro | 23 |
| 3.3.1 Estrutura de contenção | 24 |
| 3.3.2 Tanque | 25 |
| 3.3.3 Sistema de pesagem hidráulica | 27 |
| 3.3.4 Tubulação de transmissão de fluido | 29 |
| 3.3.5 Abrigo subterrâneo | 29 |
| 3.3.6 Arranjo de pistão de mercúrio | 31 |
| 3.3.7 Manômetro de leitura | 31 |
| 3.3.8 Sistema de drenagem | 32 |
| 3.4 Princípio de funcionamento | 32 |
| 3.5 Coleta de dados lisimétricos | 34 |
| 3.5.1 Coeficiente de calibração (<i>f</i>) | 35 |
| 3.5.2 Evapotranspiração de referência (ET _o) pelo lisímetro | 35 |
| 3.5.3 Volume aplicado | 36 |

| | |
|---|----|
| | ix |
| 3.6 Ensaio de calibração | 37 |
| 3.7 Métodos de estimativa da ETo | 38 |
| 3.8 Avaliação da performance dos métodos de estimativa da ETo | 42 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 43 |
| 4.1 Considerações de projeto e de operação do lisímetro | 43 |
| 4.2 Calibrações | 46 |
| 4.3 Estabilidade do tanque | 51 |
| 4.4 Área de contato entre chapa e travesseiros hidráulicos | 52 |
| 4.5 Desempenho dos métodos de estimativa da ETo | 54 |
| 5. CONCLUSÕES | 61 |
| 6. REFERÊNCIAS | 62 |
| ANEXOS | 70 |

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi a construção e testar o funcionamento de um lisímetro de pesagem hidráulica com arranjo de pistão de mercúrio, e relacionar a evapotranspiração de referência (ET_o) determinada pelo lisímetro com aquela estimada por modelos agrometeorológicos e por tanques de evaporação. A pesquisa foi conduzida na Fazenda Nossa Senhora do Rosário, Pesqueira – PE, na qual o lisímetro está instalado sob as coordenadas 08°10'25 de latitude Sul e 35°11'25 de longitude Oeste e 613 m de altitude. O clima local é do tipo BSs'h' segundo Koppen. Os dados dos elementos meteorológicos e de evaporação foram obtidos de uma estação agrometeorológica automática (Campbell Scientific ET106), de um Tanque Classe A e de um Tanque Experimental. Foram usadas as seguintes equações: Blaney-Criddle, Camargo, Hargreaves-Samani, Jensen-Haise, Makkink, Penmam-1963, Penmam-FAO, Penmam-Monteith, Radiação-FAO e Thorntwaite-Camargo. O lisímetro tem capacidade volumétrica de 2,059 m³ e uma área superficial de 2,086 m² plantada com capim pangola (*Digitaria decumbens* Stent.). Os testes preliminares de calibração, numa faixa de até 50 mm de lâmina d'água, com retiradas progressivas de volume de 1 dm³ dos travesseiros hidráulicos, revelaram excelentes respostas em todos os testes. O lisímetro operou com uma precisão final de campo de 0,143 mm, com um volume de 14 dm³. A estabilidade do lisímetro foi elevada, sendo o maior erro médio posicional medido de 3,93 %. O desempenho do lisímetro segundo o índice de Willmott, tomando-se o método Penmam-Monteith como padrão, foi "Péssimo" para medidas em escala diária e "Mal" em dados tridiais, revelando o forte efeito advectivo local sobre a evapotranspiração. O mesmo efeito foi evidenciado sobre as leituras dos tanques de evaporação, que também tiveram desempenho insatisfatório em relação ao método padrão.

Palavras-chave: lisímetro, métodos agrometeorológicos, evapotranspiração de referência.

ABSTRACT

The aim of this work was to build and test the functioning of an hydraulic weighing lysimeter with a mercury piston arrangement, and to relate the reference evapotranspiration (ET_o) determined by the lysimeter with that estimated by agrometeorological models and by evaporimetric pans. The research was conducted at the Nossa Senhora do Rosário Farm, in Pesqueira, Pernambuco State, Brazil, where the lysimeter is located under the coordinates 08°10'25" South latitude and 35°11'25" west latitude and at an altitude of 613 m. The local climate is of the BS's'h type according to Koppen. The meteorological elements data and the evaporation were obtained from an automatic agrometeorological station (Campbell Scientific ET106), from a Class A pan and from an experimental pan. The following models were used: Blaney-Criddle, Camargo, Hargreaves-Samani, Jensen-Haise, Makkink, Penman-1963, Penman-FAO, Penman-Monteith, Radiação-FAO e Thornthwaite-Camargo. The lysimeter tank had a volume capacity of 2.059 m³ and a surface area of 2.068 m², planted with pangola grass (*Digitaria decumbens* Stent.). The preliminary calibrations tests, using up to 50 mm water depth, with progressive withdrawals of 1 dm³ volume from the hydraulic pillows, showed excellent responses throughout the testing. The range lysimeter operated with a final field precision of 0.143 mm, corresponding to a volume of 14 dm³. The lysimeter stability was high, where the greatest positional average error measured at 3.93%. The lysimeter's performance according to Willmott's index, using Penman-Monteith method as a standard, was "Very bad" for measurements on a daily scale and "Bad" with tri-daily dates, revealing a strong local advective effect upon evapotranspiration. The same effect was evidenced upon the readings of the evaporation pans, which also showed unsatisfactory performance in relationship to the standard method.

Key-words: lysimeter, agrometeorological methods, reference evapotranspiration.

1. INTRODUÇÃO

A agricultura irrigada é uma atividade do setor primário da economia brasileira que nos últimos anos vem se desenvolvendo a passos largos com implantação de pólos de irrigação em diversas regiões. Essa atividade é caracterizada pelo uso intensivo de insumos agrícolas e pela aplicação de grandes quantidades de água. No entanto, o inadequado manejo de irrigação, com aplicações de lâminas fora de consonância com as necessidades das culturas tem causado problemas de cunho econômico (custos) e agronômicos (encharcamento e salinidade).

A quantificação dos termos do balanço hídrico no solo constitui ferramenta importante na avaliação do potencial hídrico para fins hidrológicos e agrícolas. Em agricultura irrigada, a componente evapotranspiração (ET) tem importância capital, pois representa o conteúdo de água perdida para a atmosfera e que deve ser repostada de forma a garantir o desenvolvimento adequado das culturas. Na agricultura de sequeiro o conhecimento da demanda evapotranspirativa é necessário para o planejamento agrícola, com fins de estabelecimento de calendário de plantio e estudo de avaliação de necessidade de irrigação suplementar.

Este termo juntamente com outros elementos meteorológicos e de solos, fornece subsídios básicos à regionalização das áreas mais adequadas ao desenvolvimento de determinadas espécies vegetais. Além disso, a avaliação da quantidade de água exigida por determinada cultura torna-se ainda mais importante, sobretudo, em regiões áridas ou com secas periódicas, onde o

crescimento e o desenvolvimento das plantas são limitados pelo fator hídrico (Galvani & Escobedo, 2001).

No Brasil, os dados de evapotranspiração utilizados no dimensionamento e no manejo de projetos de irrigação, quase sempre são obtidos utilizando-se equações de estimativa de ET a partir de dados meteorológicos, a exemplo das equações de Blaney-Cridlle e de Hargreaves, que pela simplicidade, estão entre as mais utilizadas no Nordeste (Miranda et al, 1999). No entanto, é necessário submeter à prova a precisão dessas equações, usando-se métodos diretos de medida da ET, para as diferentes condições agroclimáticas.

Tucci (2001) comenta que o planejamento de áreas agrícolas de sequeiro ou irrigadas, a previsão de cheias ou a construção e operação de reservatórios, requerem dados confiáveis de evaporação e/ou evapotranspiração. Dantas Neto (1999), no entanto, salienta que nem sempre os métodos usados para estimar a demanda hídrica em dado local são confiáveis, o que resulta em manejo de irrigação inadequado.

Dos métodos diretos o mais preciso é o uso de lisímetros (Bernardo, 1989; Howel et al, 1985; Mendonça et al, 2001; Rocha et al., 2003). Estes dispositivos permitem determinar a evapotranspiração desde períodos quinzenais, com lisímetros de drenagem, a diários ou mesmo horários, mediante os lisímetros de pesagem.

Lisímetros de pesagem são equipamentos precisos devido ao grande aparato tecnológico, verificados naqueles equipados eletronicamente, mas 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 e oferecem resolução de leitura satisfatória, podendo

detectar valores de lâmina evapotranspirada abaixo de 0,30 mm como verificado por Dilla & Cox (1973), Silva (2000), Freitas (1994) e Costa (1999).

Os objetivos deste trabalho foram construir, instalar e promover testes de funcionamento de um lisímetro de pesagem hidráulica equipado com arranjo de pistão com mercúrio, bem como medir a evapotranspiração de referência e correlacioná-la com aquela obtida por meio de equações de estimativa e de tanques de evaporação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Evapotranspiração como um processo biofísico

A transferência natural de água no estado líquido para o gasoso, interpreta-se pela teoria cinética da matéria. Conforme Ometto (1981) nos sólidos e líquidos predominam as forças de atração entre as partículas do corpo. Nos gases, as forças de atração entre partículas são ainda menores, e suficientes para libertar umas das outras sob certas circunstâncias. A fonte quase que exclusiva na evaporação natural da água é a radiação solar, sendo necessário cerca de 590 calorias por cada grama de água pura sob uma pressão de uma atmosfera e 0°C de temperatura.

A transpiração consiste na vaporização de água líquida contida nos tecidos da planta e da remoção do vapor para a atmosfera. Praticamente, toda água absorvida é perdida pela transpiração e somente uma pequena fração é usada no interior da planta (Couto & Sans, 2002). A transpiração se relaciona diretamente com a fotossíntese e o rendimento das culturas (Mota, 1983; Assis & Verona, 1991).

A evapotranspiração envolve, conjuntamente, a transpiração da planta e a evaporação do solo. Fisicamente ambos os processos de transpiração e

evaporação são idênticos (Mota, 1983; Tucci, 2001). No entanto, na transpiração existe a interferência biológica da planta, que regula o processo transpirativo conforme as condições climáticas (Withers & Vipond, 1988).

O processo evapotranspirativo é função dos elementos meteorológicos, do solo e da planta. Segundo Villa Nova (1987), é difícil a separação da ação de cada um dos elementos meteorológicos na evapotranspiração, pois os mesmos agem simultaneamente. Mas de uma maneira geral, em uma dada região, quanto maiores forem a disponibilidade de energia solar, a temperatura do ar, a velocidade do vento e quanto menor for a umidade relativa do ar, maior será a demanda evapotranspirativa (Soares, 2001). Se o solo for capaz de suprir água rapidamente o bastante para satisfazer a demanda evaporativa, a evaporação do solo é determinada somente pelas condições meteorológicas (Couto & Sans, 2002, Hargreaves, 1973; Camargo & Camargo, 2000; Santiago, 2002). Klar (1988) relata que o deficit hídrico causa o aparecimento de forças de retenção no solo que limitam a perda de água à atmosfera.

2.2 Conceitos de evapotranspiração

O conceito de evapotranspiração potencial (EP) foi introduzido por Thornthwaite e aperfeiçoado em diversas oportunidades. Em 1948 ele a definiu como sendo a perda de água de uma extensa superfície vegetada, de porte rasteiro, em fase de desenvolvimento ativo e sem limitações hídrica (Almeida et al., 1999).

A evapotranspiração real se refere a quantidade de água transferida para a atmosfera por evaporação e transpiração, sob condições reais de fatores atmosféricos e umidade do solo (Camargo & Camargo, 2000; Pereira et al., 1997; Gangopadhyaya et al., 1968). Ocorre, portanto, em qualquer circunstância, sem imposição de qualquer condição de contorno, podendo então, assumir um valor igual ou menor que a evapotranspiração potencial.

O termo evapotranspiração de referência (ET_o) foi definido por Doorenbos & Pruitt (1977), como aquela que ocorre em uma extensa superfície coberta com grama de 0,08 a 0,15 m, em crescimento ativo, cobrindo totalmente o solo e sem deficiência de água. Para Pereira et al (1997) esta definição de evapotranspiração de referência coincide com a evapotranspiração potencial. Já Jensen (1973) relata que a utilização da alfafa na definição da ET_o é mais realista quanto à representatividade aerodinâmica de outras culturas do que a grama, que tem porte mais baixo e menor rugosidade. Em sua definição ele estabelece a altura da alfafa (*Medicago sativa* L.) entre 0,30 e 0,50 m e uma área tampão em torno de 100 m.

Diante da falta de consenso entre estudiosos, o conceito de evapotranspiração de referência foi, então, redefinido pela FAO, onde Smith (1991) referiu-se como sendo a taxa de evapotranspiração de uma cultura hipotética com altura de 12 cm, resistência aerodinâmica de 0,69 s m⁻¹ e albedo de 0,23 a qual representaria a evapotranspiração de uma superfície extensa e coberta por um gramado, com altura uniforme em fase de crescimento ativo, sombreando completamente o solo e sem restrição de água (Allen et al., 1994; Assis, 1995).

2.3 Lisímetros para determinação da evapotranspiração de referência (ET_o)

Existem vários métodos de determinação direta da perda de água do solo via evapotranspiração. O balanço hídrico do solo, a medição da umidade e os lisímetros constituem alguns desses métodos.

Aplicando a equação do balanço hídrico do solo em 25 pontos de um transecto de 125 m, Villagra et al. (1995) encontraram um coeficiente de variação de 40 % na estimativa da evapotranspiração, indicando que este método não é uma boa alternativa para estimativa da evapotranspiração.

Howell et al (1985) comentam que a medição da variação de peso de um bloco de solo isolado (lisímetro de pesagem) é considerada um dos métodos de pesquisa mais práticos e precisos para se determinar diretamente a evapotranspiração das culturas, podendo ser utilizada para períodos de tempo menores que um dia.

Basicamente os lisímetros são divididos em pesáveis e não pesáveis. O tipo não pesável é o mais simples e utilizado para determinação da evapotranspiração pela medição da água de irrigação ou precipitação e da água de drenagem, apresentando, porém, restrição para medidas diárias (Dilla & Cox, 1973).

Os lisímetros pesáveis são subdivididos conforme o princípio de pesagem, sendo agrupados em: mecânicos, eletrônicos, hidráulicos e flutuantes. O lisímetro flutuante consiste em um reservatório preenchido com solo que flutua em um fluido de alta densidade, geralmente $ZnCl_2$, e as variações de leitura são feitas segundo o princípio de Arquimedes (Mcmillan & Paul, 1961; Aboukhaled, 1982).

Nos lisímetros de pesagem mecânica são usadas plataformas ou mesmo guindastes para medir a variação de massa do tanque. Nos lisímetros de pesagem eletrônica a mudança de massa é medida por travesseiros de tensão ou células de carga que se deformam dentro do regime elástico a que foram planejadas. Esta deformação, embora pequena, é suficiente para gerar um sinal de saída linear e compatível a carga aplicada. O uso de dispositivos microeletrônicos, que permitem a automação das medidas lisimétricas, podem registrar valores em escala de tempo reduzida com precisão de 0,01 mm (Pereira et al., 1997).

Os custos relacionados à construção e operação dos equipamentos mecânicos ou eletrônicos podem ser restritivos (Gomide et al. , 1996; Miranda et al., 1999; Allen & Fisher, 1990).

Os lisímetros hidráulicos embora menos precisos que os de pesagem mecânica e eletrônica, oferecem precisão satisfatória. Kruse & Neale (1989) relatam que os custos desses equipamentos são bem mais acessíveis. A resolução nos evapotranspirômetros hidráulicos varia de 0,025 mm naqueles destinados aos estudos de fisiologia vegetal, a 1,00 mm nos aplicados na obtenção diária da ETo (Aboukhaled et al, 1982).

O primeiro lisímetro de que se tem conhecimento foi instalado por De La Hire em Rungis, próximo a Paris, em 1688. No Brasil, os lisímetros começaram a ser usados na década de 50. Camargo, em 1962, usou evapotranspirômetros para medir a evapotranspiração potencial em São Paulo.

Rodrigues (1987), em Parnamirim-PE, construiu um lisímetro de pesagem hidráulica usando matérias-primas de fácil aquisição e custo reduzido. Ele comparou os dados de ETo com a evaporação do tanque classe, sendo um dos primeiros a obter os primeiros dados de coeficiente de tanque (K_p) no Brasil por esta metodologia. Em Serra Talhada, Freitas (1994) construiu um lisímetro por sensor de carga hidráulica em formato circular com 1,25 m² de área superficial de solo, 0,90 m de profundidade e precisão de 0,21 mm. Costa (1999) instalou em Petrolina-PE um lisímetro hidráulico com arranjo de pistão de mercúrio com 1,37 m de profundidade, 1,79 m² de área superficial de solo e precisão de 0,29 mm. O mesmo lisímetro foi modificado estruturalmente por Silva (2000) para melhorar a condição de equilíbrio e corrigir falhas no sistema de pesagem. O lisímetro passou a ter uma precisão de 0,26 mm considerando os mesmos critérios de leitura adotados por Costa (1999).

2.4 Fatores que afetam as medições lisimétricas

O lisímetro é tido por muitos autores como um equipamento que mede a evapotranspiração real da cultura nele cultivada por meio de um balanço hídrico. No entanto, outros pesquisadores questionam este fato, considerando-o como um dispositivo que estima a evapotranspiração, na medida em que as condições nas

quais as medições lisimétricas são realizadas, que nem sempre são representativas daquelas em que as plantas são cultivadas (Silva, 2003).

Alguns dos principais fatores (ambientais e de projeto) que podem afetar as medições evapotranspirativas são: os efeitos de advecção, as dimensões do lisímetro, o regime de umidade do solo no seu interior, a espessura das paredes do lisímetro e a distância entre elas, a altura de suas bordas e diferenças de densidade entre a vegetação dentro e fora do lisímetro (Miranda et al., 1999).

Suponha uma área vegetada e suficientemente úmida circundada por uma outra área seca. Na área seca grande parte da energia disponível será usada no aquecimento do solo e do ar. Na área úmida elevada proporção da radiação solar disponível será transformada em calor latente. Essa condição criará um gradiente térmico em favor da área úmida. Este fenômeno eleva a evapotranspiração a patamares além da condição potencial de referência e constitui uma das fontes de erro nas determinações lisimétricas. Villa Nova & Reichardt (1989) a denominaram de evapotranspiração máxima (ET_m), e para sua minimização deve-se prover uma área tampão, fetch ou de bordadura em volta do lisímetro. Withers & Vipond (1988) e Silva (2003) descrevem o mesmo fenômeno em regiões áridas e ressaltam que qualquer dado meteorológico obtido em um local pode não ser satisfatório para outro mesmo que situado a pequena distância.

A calibração do lisímetro é uma das etapas mais importantes durante a instalação do equipamento, pois, calibrações mal feitas levam a interpretações inconsistentes dos valores de evapotranspiração, principalmente quando se trabalha em períodos curtos de tempo (Campeche, 2002).

Outra fonte de erro é devido à variação de temperatura diária. Dilla & Cox (1973) conduziram testes mostrando que mudanças de temperatura diurnas causaram mudanças excessivas nas leituras acima do solo com nenhuma

mudança de massa no tanque do lisímetro. Kruse & Neale (1989) relatam que a utilização de manequins de travesseiros são usados para correções das leituras.

A pressão lateral do vento exercida sobre a superfície de solo do lisímetro pode alterar as respostas nas calibrações e nas leituras. Silva et al. (1999a) relatam que Bergamashi et al. (1997) observaram que abalos físicos, sobretudo vento, provocam oscilações nas leituras nos lisímetros de pesagem.

2.5 Equações de estimativa da evapotranspiração de referência

Burman et al. (1983) relatam que não existe método indireto que utilize dados meteorológicos que seja universalmente adequado em todos os tipos de clima, principalmente em regiões tropicais e regiões altas, sem algum tipo de ajuste (Costa, 1999).

O método de Thornthwaite, em 1948, foi proposto para a estimativa da evapotranspiração potencial (ETp) mensal de um gramado. Foi desenvolvida com base em balanços hídricos em bacias hidrográficas e em medidas de evapotranspiração em lisímetros de drenagem e utiliza a temperatura do ar como parâmetro. A equação de Thornthwaite ganhou popularidade mundial, mais pelo fato de necessitar somente de dados de temperatura do ar, informação disponível em grande número de estações e mesmo em postos meteorológicos, do que pela sua precisão (Sediyama, 1996).

Em 1960, Camargo propôs uma simplificação da equação de Thornthwaite pela substituição do índice de calor (I) por um índice que corresponde a temperatura média anual num nomograma, o qual fornece a ETPp mensal para um mês padrão de 30 dias e 12 horas de fotoperíodo (Pereira et al., 1997).

Camargo (1971) baseando-se na equação de Thornthwaite propôs uma fórmula simples que tem como variáveis a radiação solar extraterrestre diária, a

temperatura média do período considerado e um fator de ajuste F em função da temperatura média anual (Camargo & Camargo, 1983).

Makkink, em 1957, correlacionando dados de evapotranspiração potencial de um lisímetro com a radiação solar ao nível do solo em equivalente de evaporação (mm), obteve uma equação linear em que a variável independente é a radiação solar. O método FAO-24 da radiação trata-se de uma adaptação do método de Makkink pela substituição dos coeficientes a e b da equação por um parâmetro “c” em função da umidade relativa do ar e da velocidade do vento.

Hargreaves & Samani (1985) propuseram um método que utiliza as temperaturas diárias máxima, mínima e média e a radiação extraterrestre. Para locais sob forte influência das temperaturas extremas (altitudes elevadas) incluíram a altitude como um dos parâmetros (Pereira et al., 1997).

O método de Blaney-Criddle foi desenvolvido no semi-árido americano. Na versão modificada pela FAO (Doorenbos & Pruitt, 1977), o método leva em consideração para estimativa da ETo o fotoperíodo e a temperatura média mensal.

A fórmula de Penman tem sido a base para a maioria dos estudos teóricos e experimentais. Esta fórmula combina o balanço de energia local na superfície (termo diabático) com um termo aerodinâmico (adiabático), o qual é uma função empírica da velocidade do vento (Sediyama, 1996).

Monteith, em 1965, discutiu os conceitos e relações de resistência aerodinâmica e do dossel da cultura, incorporando estes parâmetros na equação de Penman, a qual passou a ser chamada de Penman Monteith. Isto rendeu a este método o reconhecimento internacional como um dos mais precisos para estimar a ETo (Bastos et al., 1996; Almeida et al., 1999).

Em 1990, os métodos recomendados pela FAO foram submetidos a uma revisão, feita por especialistas em evapotranspiração, os quais chegaram a conclusão que o método de cálculo, baseado na fórmula de Penman-Montheit, apresentava os melhores resultados em estudos comparativos, realizados em diversas condições de clima, passando então, a ser recomendado pela FAO como método padrão para estimativa da ETo (Dantas Neto, 1999, Soares et al., 1999).

2.6 Tanque evaporimétrico

Existem vários tipos de tanques de evaporação citados na literatura. Entre os mais comuns, citam-se: o Australiano; o Padrão Inglês; o do Serviço Geológico do U.S.A (Withers & Vipond, 1988); o USWB Classe A; o GGI-3000; e o Tanque de 20 m² (Pereira et al., 1997).

Entretanto o modelo de tanque mais difundido, inclusive no Brasil, é o USWB Classe A, sendo inclusive recomendado pela Comissão de Instrumentos e Métodos de Observação, estabelecido pela Organização Mundial de Meteorologia (OMM). Trata-se de um cilindro construído com chapa de ferro galvanizado, com 121 cm de diâmetro e 25 cm de profundidade, instalado a 15 cm acima do nível do solo (Withers & Vipond, 1988; Pereira et al., 1997; Santiago, 2002).

Para se calcular a evapotranspiração, os evaporímetros são mais precisos e mais sensíveis em períodos curtos se comparados com as fórmulas. Vários trabalhos têm mostrado que entre os métodos utilizados para a estimativa da evapotranspiração potencial, o tanque classe A é o mais preciso, prático e econômico (Santiago, 2002). Atribui-se isto ao fato de que o tanque fornece uma leitura integrada dos efeitos da radiação, do vento, da temperatura e da umidade, e as plantas respondem de forma análoga aos mesmos fatores (Stone & Silveira, 1995; Braga & Klar, 2000).

2.7 Métodos de estimativa da evapotranspiração em trabalhos relevantes na Fazenda Nossa Senhora do Rosário

Araújo (2001) analisando o escoamento superficial na bacia de contribuição da referida Fazenda pelo uso de modelos chuva-vazão, usou o método de Thornthwaite para estimativa da ETo como um dos parâmetros.

Blackburn (2002) em estudos sobre fluxo hidrossalino subterrâneo utilizou o método do tanque classe A para estimar o termo evapotranspiração de referência. O Kt (coeficiente de tanque) adotado foi de 0,75, considerando a bordadura de grama com 10 m e admitindo a umidade relativa entre 40 e 70% e velocidade do vento de 175 km/dia, conforme recomendado por Bernardo (1989).

Santiago (2002) estudando salinidade e umidade em neossolo flúvico sob cultivo de repolho irrigado utilizou o tanque classe A para estimar a ETo, adotando o valor de 0,75 como coeficiente de tanque e considerando a umidade relativa média, de 72 %, velocidade média dos ventos de 168 km/dia e inexistência de bordadura, conforme Doorenbos & Kassan (1979).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Descrição local

A referida pesquisa foi realizada no assentamento da Fazenda Nossa Senhora do Rosário, de aproximadamente 110 ha. A propriedade está localizada à margem da rodovia BR 232, entre os municípios de Pesqueira e Arcoverde, zona fisiográfica do Agreste de Pernambuco. O local dista 230 km do Recife.

Segundo Koeppen o clima regional da bacia é semi-árido (BSs'h'). Dados obtidos da estação climatológica de Pesqueira registram uma precipitação média

anual de 730 mm e uma evapotranspiração potencial de referência, estimada por tanque classe A, de 1638 mm anual (Montenegro, 2001).

O lisímetro foi instalado em uma parcela de área com mais de 2,5 ha, coberta com vegetação rasteira de pasto com 10 cm de altura, na qual domina o capim Pangola (*Digitaria decumbens* Stent), o qual também foi usado no lisímetro. A 80 m de distância se encontram uma estação agrometeorológica automatizada (Campbell Scientific ET106 com Datalogger modelo CR10), um tanque USWB classe A e um tanque de evaporação experimental.

Neste estudo foi comparado um modelo de tanque de evaporação (Tanque experimental) elaborado pelo prof. Ronaldo José Freire, do Departamento de Tecnologia Rural da UFRPE. O tanque é cilíndrico, com diâmetro e altura de 55 cm e 38 cm, respectivamente, disposto acima do solo. A leitura é feita pela adaptação de um paquímetro plástico em um tranqüilizador.

3.2 Propriedades e características físicas do solo

O solo local está inserido na Unidade de Mapeamento RR2, classificada pedologicamente em NEOSSOLO REGOLÍTICO, que representa cerca 37 % da área da fazenda.. Resultados da caracterização física (Embrapa, 1997) até a profundidade de 110 cm, correspondente à profundidade do tanque do lisímetro se encontram resumidas na tabela 1.

Tabela 1. Algumas propriedades e características físicas do solo do lisímetro.

| Prof (cm) | 0-10 | 10-20 | 20-30 | 30-40 | 40-50 | 50-60 | 60-70 | 70-80 | 80-90 | 90-100 | 100-110 |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|---------|
| Dg (kg dm ⁻³)* | 1,63 | 1,64 | 1,69 | 1,66 | 1,71 | 1,75 | 1,76 | 1,76 | 1,77 | 1,75 | 1,72 |
| Dp (kg dm ⁻³) | 2,53 | 2,53 | 2,58 | 2,50 | 2,56 | 2,60 | 2,58 | 2,52 | 2,53 | 2,56 | 2,53 |
| Areia (%) | 69,84 | 71,84 | 70,84 | 72,34 | 67,84 | 72,84 | 72,84 | 70,84 | 66,84 | 69,84 | 76,84 |
| Silte (%) | 20,36 | 18,86 | 19,18 | 18,29 | 21,68 | 17,68 | 18,18 | 18,68 | 23,38 | 21,68 | 15,18 |
| Argila (%) | 9,80 | 9,30 | 9,98 | 9,57 | 10,48 | 9,48 | 8,98 | 10,48 | 9,78 | 8,48 | 7,98 |
| θv (cm ³ cm ⁻³) 1/10 atm | 9,80 | 8,97 | 11,08 | 12,78 | 11,81 | 10,22 | 9,62 | 8,63 | 7,97 | 8,09 | 7,18 |
| θv (cm ³ cm ⁻³) 15 atm | 3,97 | 3,92 | 4,73 | 5,14 | 4,62 | 3,52 | 3,41 | 2,94 | 2,82 | 2,51 | 2,94 |

Dg: densidade global; Dp: densidade de partículas; θV: umidade volumétrica; * amostra de solo deformada.

3.3 Descrição do lisímetro

O lisímetro é do tipo pesagem hidráulica e se compõe de um conjunto dividido em: estrutura de contenção, tanque, sistema de pesagem hidráulica, tubulação de transmissão de fluido, abrigo subterrâneo, arranjo de pistão de mercúrio, manômetro de leitura e sistema de drenagem. Um desenho esquemático da estrutura lisimétrica é mostrado na figura 1.

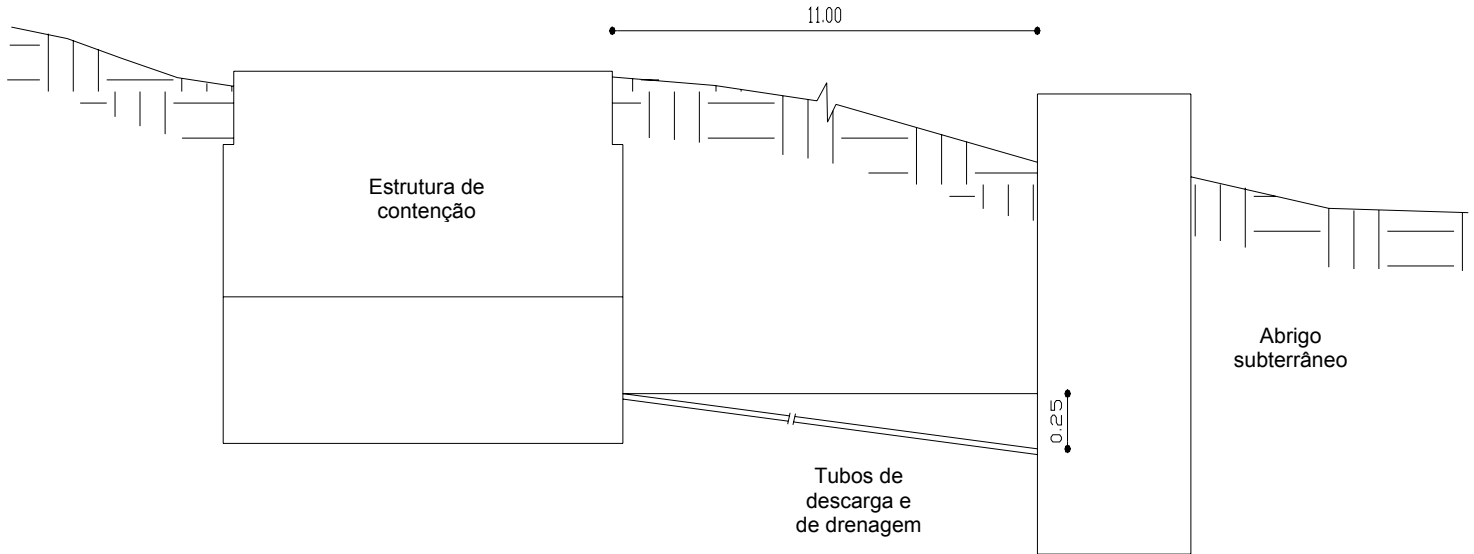


Figura 1. Esquema do lisímetro em campo (medidas em m, sem escala).

3.3.1 Estrutura de contenção

A estrutura de contenção, construída em alvenaria de tijolo e concreto, é enterrada e tem a função de comportar o tanque e permitir o isolamento ao ambiente externo. As Figuras 2 e 3 mostram a vista frontal e o corte da estrutura de contenção, respectivamente.

A porção superior tem um diâmetro de 1,70 m, o que permite uma folga radial de 0,035 m em relação ao tanque para permitir o movimento vertical livre e a oscilação radial deste sem encostar nas paredes da estrutura de contenção

Na base da estrutura de contenção partem em direção ao abrigo subterrâneo o tubo de transmissão de fluido, o dreno do tanque e o dreno de esgotamento. Este último serve para esvaziamento de água ou qualquer resíduo indesejável que por ventura venha a entrar no interior da estrutura.

3.3.2 Tanque

Trata-se de uma caixa d'água em fibra de vidro com seção transversal circular e perfil cônico, com 45 kg de peso, capacidade volumétrica de $2,059 \text{ m}^3$ e área superficial de solo de $2,086 \text{ m}^2$. As dimensões do tanque e a sua disposição sobre os travessieiros e na estrutura de contenção estão representados na figura 4.

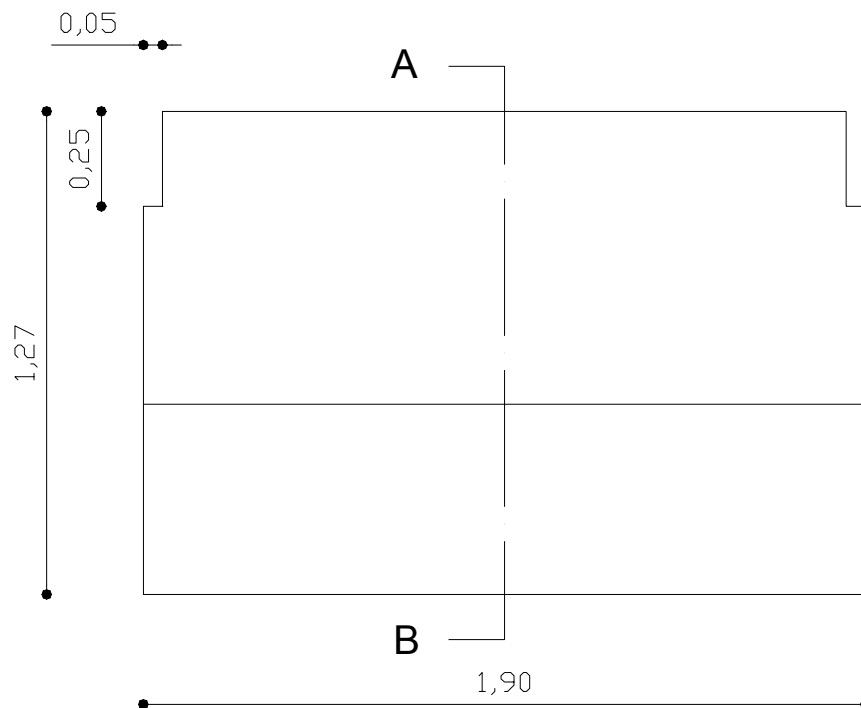


Figura 2. Vista frontal da estrutura de contenção do tanque (medidas em m, sem escala).

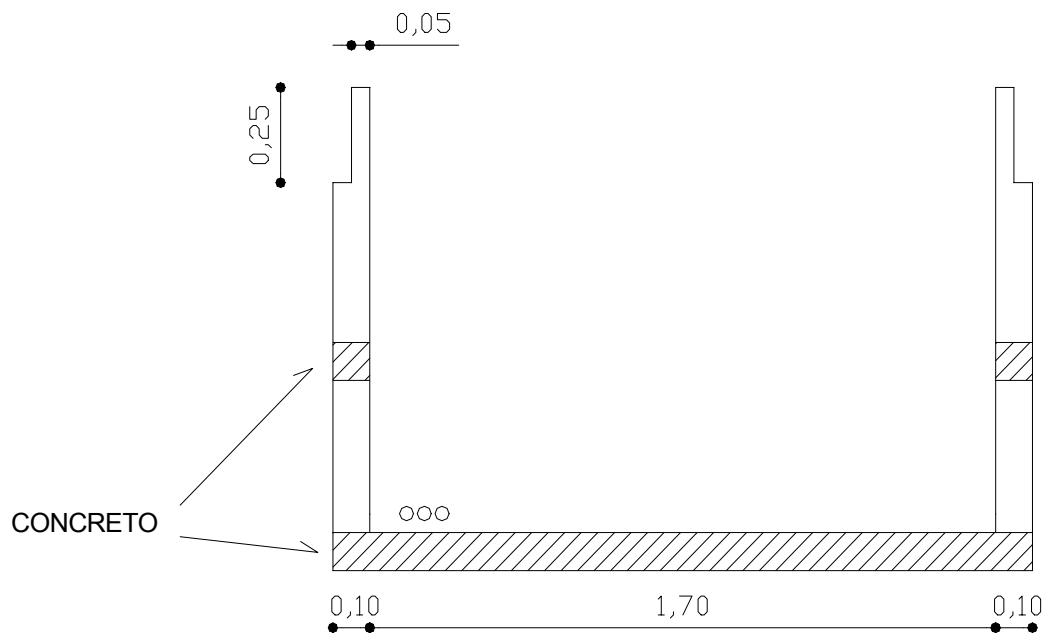


Figura 3. Corte AB da estrutura de contenção do tanque (medidas em m, sem escala).

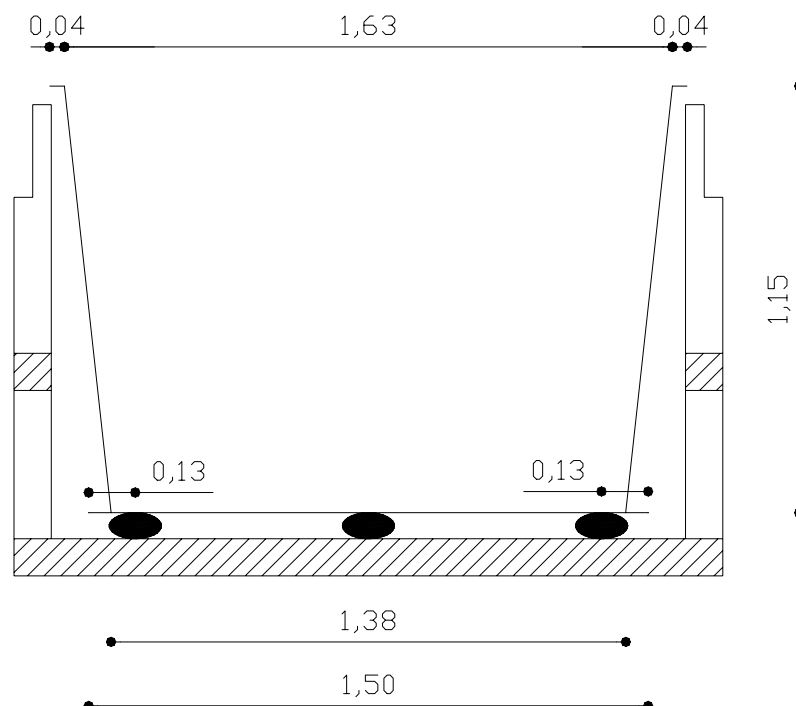


Figura 4. Tanque apoiado sobre os travesséis hidráulicos (medidas em m, sem escala).

3.3.3 Sistema de pesagem hidráulica

Este sistema recebe toda pressão resultante do peso do solo contido no tanque. Consiste de uma chapa metálica em ferro (chapa preta) e três traveseiros hidráulicos. Cada traveseiro foi composto por um segmento de mangueira flexível de butil com alma de nylon com 100 mm de diâmetro e 1,7 m de comprimento, fechado em cada extremidade pela compressão de presilhas, conforme mostrado na Figura 5 abaixo.

A utilização da chapa metálica é uma modificação do sistema de pesagem em relação aos lisímetros construídos por Freitas (1994) e Costa (1999) e às alterações feitas por Silva (2000), nos quais foram empregados calhas de ferro independentes (viga virada). A chapa tem formato quadrado de 1,5 m de lado e espessura de 10 mm e apóia completamente o tanque (Figura 6).



Figura 5. Traveseiros hidráulicos conectados a tubulação de transmissão de fluido. Os traveseiros são presos nas extremidades por presilhas.

Antes da montagem a chapa recebeu um tratamento antioxidante que envolveu o lixamento para remoção de crostas de metal oxidado; fosfatização, uma limpeza química que neutraliza materiais corrosivos; pintura com zarcão

naval; aplicação de primer e emborrachamento (batida de pedra); e cobertura com lubrificante hidrofóbico (a base de graxa).

Um inconveniente comumente observado nas extremidades dos traveseiros hidráulicos de lisímetros de pesagem é a presença de uma inflação voltada para cima na porção terminal onde ficam as conexões dos traveseiros. Esta inflação decorre da ausência de contato do traveseiro com a chapa metálica. Isto pode interferir nas leituras do manômetro uma vez que esta porção livre se deforma diferentemente da parte em contato íntimo com a chapa quando submetido a variações de carga. Para contornar esse problema foram feitos três cortes quadrados (5,5 cm de lado) na chapa para permitir o encaixe das três conexões dos traveseiros. Esse corte possibilitou a parte, antes livre, ficasse em contato com a chapa (Figura 6).



Figura 6. Chapa metálica montada sobre os traveseiros hidráulicos (esq.); Encaixes das conexões dos traveseiros na chapa (dir.)

O enchimento dos traveseiros com fluido hidráulico (água) foi feito com o mesmo na vertical deixando vedado apenas uma das extremidades. Colocou-se o fluido até a borda (passando do ponto de vedação). Em seguida procedeu-se o repouso durante 24 horas com o traveseiro ainda aberto para permitir a coalescência de bolhas de ar dissolvidas na água. Em seguida fez-se a compressão com as presilhas com o traveseiro ainda totalmente preenchido. Isto

impede a entrada de ar pela expulsão da água ao se proceder o fechamento do travesseiro.

Antes do enchimento dos travesseiros hidráulicos o fluido foi tratado biologicamente mediante a adição de um biocida, o sulfato de cobre, para inibir o crescimento de algas, na proporção de 0,30 g / L de fluido (água).

3.3.4 Tubulação de transmissão de fluido

Consiste em uma mangueira plástica de cristal flexível transparente com 12,5 mm de diâmetro interno. Esta tubulação faz a ligação entre o sistema de pesagem e o arranjo de pistão de mercúrio. No sistema de pesagem os tubos são conectados em cada travesseiro por um conjunto de conexões formado por: adaptador interno roscável para mangueira de 12,5 mm, joelho 90° roscável de 12,5 mm e adaptador flange auto-ajustável roscável 12,5mm (Figura 6). Os tubos conectados aos travesseiros convergem para formar um único tubo pela utilização de 2 joelhos internos 90° com 12,5 mm para mangueira e 2 T's. Este tubo de transmissão se liga ao arranjo de pistão de mercúrio mediante um adaptador interno roscável para mangueira de 12,5 mm, uma bucha soldável-roscável com redução de $\frac{3}{4}$ " para 12,5 mm e uma luva soldável-roscável com redução de 25 mm para $\frac{3}{4}$ ".

3.3.5 Abrigo subterrâneo

As dimensões do abrigo estão representadas em vista e em corte na Figura 7. Nele estão comportados a saída do tubo de drenagem, o arranjo de pistão de mercúrio, o manômetro de leitura, o coletor do drenado e a saída do dreno de esgotamento da estrutura de contenção (Figura 8).

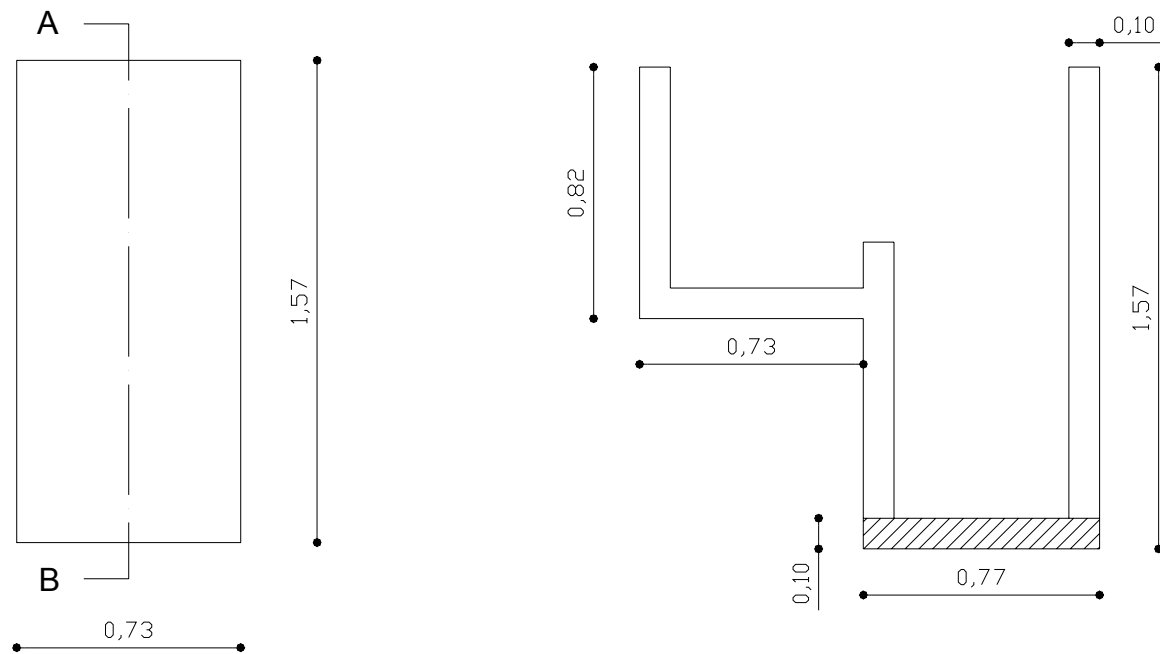


Figura 7. Vista frontal do abrigo subterrâneo (esq.); Corte AB do abrigo subterrâneo (dir.) (medidas em m, sem escala).

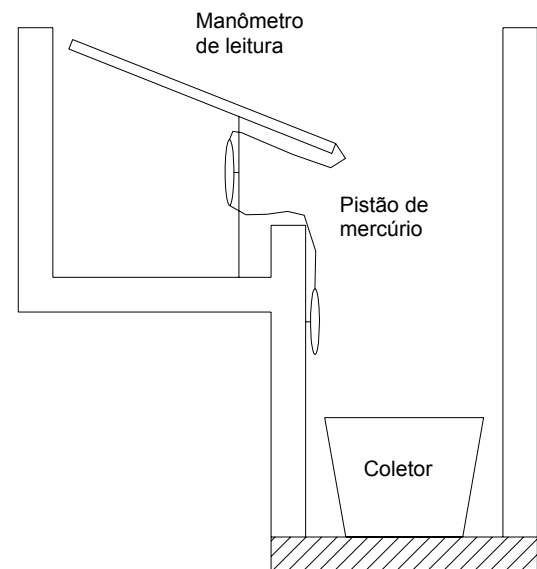


Figura 8. Abrigo subterrâneo em campo (esq.); Disposição do coletor de drenado, do arranjo de pistão de mercúrio e do manômetro de leitura no abrigo subterrâneo (dir.).

3.3.6 Arranjo de pistão de mercúrio

Dois tubos de vidro interconectados e apoiados em uma haste de metal estão preenchidos com mercúrio metálico. Ambos os tubos têm 130 mm de comprimento e diâmetros interno e externo de 25 e 32 mm, respectivamente. No primeiro tubo é encaixada na parte superior uma luva soldável com redução de 32 mm para 25 mm de diâmetro, e na inferior um cape soldável de 32 mm de diâmetro. No segundo tubo de vidro ambas as extremidades se encaixam em capes de 32 mm de diâmetro. A ligação entre os dois tubos de vidro é feita por um microtubo plástico de 2 mm de diâmetro encaixado em dois conectores de $\frac{1}{4}$ de polegada. A figura 9 mostra um dos tubos e pistão de mercúrio.



Figura 9. Tubo do pistão montado (esq.); Arranjo de pistão de mercúrio e manômetro (dir.).

3.3.7 Manômetro de leitura

O manômetro consiste em um suporte no qual se apóiam, paralelamente, um tubo de vidro de 1 mm de diâmetro interno e uma régua de 500 mm de escala

com graduação de 1 mm (Figura 9). O pistão transmite o fluido de leitura ao tubo de vidro. O fluido de leitura tem cor azul (corante + água) para melhor visualização e seu nível dentro do microtubo varia proporcionalmente com a carga do tanque.

3.3.8 Sistema de drenagem

A drenagem do lisímetro é feita por gravidade (drenagem livre). No fundo do tanque a captação da água gravitacional é feita por uma malha de tubos de PVC com 25 mm de diâmetro interno, perfurados e envolvidos por sacos de ráfia.

No fundo do tanque foi adicionada uma camada de brita número 18 de cerca de 10 cm e superposta a está uma camada de 3 cm de cascalho para atuar como filtro da água gravitacional em direção aos tubos de drenagem. A malha de tubos foi conectada a uma única saída por meio de uma luva soldável-roscável com redução de 25 mm para $\frac{3}{4}$ de polegada e um adaptador flange auto-ajustável roscável de $\frac{3}{4}$ de polegada. Na parte externa do tanque, a partir do adaptador flange, uma tubulação de 25 mm de diâmetro e 11,5 m conduz o drenado até o abrigo, onde é captado por um coletor. O coletor tem capacidade para 35 L (equivalente a uma drenagem de 17 mm).

Como a drenagem do tanque é livre, apenas a gravidade promove a retirada da água. Por conta disso a captação da água de drenagem é lenta e pode durar mais de 1 dia dependendo do excedente de lâmina acima da capacidade de recipiente.

3.4 Princípio de funcionamento

Ao aplicar uma carga sobre o lisímetro, a pressão exercida nos traveseiros desloca um volume de fluido proporcional a essa pressão. Esse volume de fluido será transmitido até o manômetro de leitura.

Com o uso de apenas água como fluido a pressão seria compensada pela altura manométrica da coluna de água, em torno de 3,5 m. Isto representaria um incômodo à realização das leituras devido à altura excessiva acima do solo e submeteria o fluido aos efeitos dilatativos causado pela incidência da radiação solar, o que alteraria a leitura do manômetro mesmo sem mudança de carga.

Como a pressão é dependente da altura manométrica e da densidade do fluido a utilização de um fluido com maior densidade que do que a da água diminui proporcionalmente a altura da coluna mantendo a pressão inalterada. Utilizando-se o mercúrio metálico, cuja densidade é aproximadamente 13,6 vezes maior que a da água, o uso do arranjo de pistão de mercúrio reduz a altura manométrica na mesma proporção. Deste modo a altura seria reduzida para 0,26 m, possibilitando leituras abaixo do nível do solo. Isto além de tornar o procedimento de leitura menos trabalhoso, permite que o fluido e o manômetro de leitura fiquem abrigados da incidência direta dos raios solares e, portanto menos exposto a flutuação de leituras.

A implantação do arranjo de pistão de mercúrio, entretanto, implica na perda de sensibilidade do manômetro de leitura às variações de carga do lisímetro, devido a densidade do mercúrio, que confere um deslocamento de altura da coluna 13,6 vezes menor que a água.

A relação entre o diâmetro do tubo de leitura do manômetro ($D_1 = 1 \text{ mm}$) e o do tubo do pistão ($D_2 = 25 \text{ mm}$) é igual a 25, enquanto a relação de área da seção transversal entre eles varia com o quadrado do diâmetro, pois:

$$A = \pi D^2$$

sendo A a área e D o diâmetro interno.

Assim o deslocamento de um volume com altura unitária de fluido manométrico no tubo do pistão provocará uma variação de altura no tubo de leitura do manômetro 625 vezes maior, conforme demonstrado abaixo.

$$V_1 = V_2$$

$$A_1 \cdot H_1 = A_2 \cdot H_2$$

$$\pi D_1^2 \cdot H_1 = \pi D_2^2 H_2$$

$$H_1 = \pi D_2^2 H_2 / \pi D_1^2$$

$$H_1 = D_2^2 H_2 / D_1^2$$

sendo H1 e H2, respectivamente, as alturas de deslocamento no tubo do manômetro e no tubo do pistão.

Fazendo a substituição de valores

$$H_1 = (25)^2 H_2 / (1)^2$$

$$H_1 = 625 H_2$$

Com este artifício, amplia-se a sensibilidade perdida devido ao arranjo com pistão de mercúrio.

3.5 Coleta de dados lisimétricos

Os dados lisimétricos foram coletados diariamente por um técnico treinado, residente no Assentamento e que também é encarregado da coleta de dados de evaporação dos tanques. A leitura inicial (Li) refere-se altura da coluna de água no manômetro; a precipitação é coletada por pluviômetros em mm e é convertida em volume precipitado (Vp); a nova leitura inicial (NLI) só é preenchida quando a precipitação pluvial do dia anterior causa uma leitura inicial maior que a leitura final do dia anterior, o que caracteriza uma retenção de água livre; o volume drenado (Vd) é a água gravitacional coletada no recipiente de coleta do abrigo subterrâneo; a água aplicada (Va) é o volume de água perdido por

evapotranspiração e drenagem e que deve ser resposto de modo a restabelecer a capacidade de recipiente (capacidade de campo); a leitura final é a leitura no manômetro 2 a 3 minutos após o cálculo da (V_a). Anota-se também o peso fresco da grama por ocasião de corte para manutenção da altura.

Primeiramente é medido em proveta o volume drenado coletado e que se refere ao balanço hídrico do dia anterior; efetua-se a leitura inicial, referente à variação da massa do tanque causada por evapotranspiração e drenagem; calcula-se o volume de água aplicada, a qual é medida em uma proveta e regada sobre a área de solo do tanque; após a estabilização do manômetro procede-se a leitura final (L_f).

3.5.1 Coeficiente de calibração (f)

O coeficiente de calibração é a razão entre a leitura, em mm, no manômetro e a massa de carregamento ou descarregamento no tanque, expresso em mm de lâmina de água. Como a área superficial de solo no tanque é $2,086 \text{ m}^2$, a adição de uma massa de $2,086 \text{ kg}$ equivale a uma lâmina de 1 mm de água.

3.5.2 Evapotranspiração de referência (E_{To}) pelo lisímetro

A evapotranspiração de referência determinada pelo lisímetro foi calculada pela seguinte equação:

$$E_{To} = [(\Delta L / f) + P - D - G]$$

sendo E_{To} = evapotranspiração de referência, em mm dia^{-1} ;

ΔL = variação de leitura, em mm/dia ;

f = coeficiente de calibração [leitura (mm) / lâmina (mm)];

P = lâmina precipitada, em mm/dia ;

D = lâmina drenada, em mm ;

G = lâmina de água (mm/dia) equivalente à massa da grama (kg/dia).

A conversão de volume drenado (V_d) em lâmina drenada (D) é feita conforme a expressão abaixo.

$$D = V_d / A_s$$

sendo A_s a área superficial de solo do tanque, que é igual $2,086 \text{ m}^2$. Sendo V_d dado em dm^3 D será expresso em mm. Basta, então, dividir o volume drenado (dm^3) por 2,086 para obter a lâmina drenada.

A conversão da massa da grama por ocasião do corte em mm de água é semelhante, sendo feita considerando a seguinte relação: 1 mm de água = 2,086 kg de grama cortada. Assim:

$$G = \text{massa de grama cortada (kg)} / 2,086$$

3.5.3 Volume aplicado

O volume de água para restabelecimento da capacidade de recipiente é calculado com base na variação de massa devido às perdas por drenagem e evapotranspiração em um período de 24 horas. O volume aplicado é calculado pela seguinte equação:

$$V_a = (\Delta L r) - V_d$$

em que ΔL é variação de leitura e é dado por

$$\Delta L = L_f - L_i$$

sendo V_a = volume aplicado, em dm^3 ;

r = coeficiente de conversão de mm de leitura em dm^3 de água;

V_d = volume drenado, em dm^3 ;

L_f = leitura final (dia anterior), em mm;

L_i = leitura inicial (dia corrente), em mm.

Para facilitar o trabalho do técnico responsável lhe foi entregue uma ficha contendo os valores de conversão de ΔL r em dm^3 .

Em caso de ocorrência de precipitação que exceda a capacidade de recipiente a leitura inicial do dia posterior pode ser maior que a leitura final do dia atual. Neste caso deve-se proceder a inclusão da lâmina precipitada em uma nova leitura inicial (N L_i).

3.6 Ensaio de calibração

Como o projeto do lisímetro não contemplava uma estrutura de acesso aos componentes móveis, foi procedido uma bateria de testes em galpão para avaliar a confiabilidade de funcionamento, de forma a garantir o bom desempenho em campo.

Cada ensaio de calibração consistiu em um carregamento progressivo de massas conhecidas seguido de um descarregamento. As leituras no manômetro foram feitas em mm, com uma amplitude de carga equivalente a uma lâmina de até 50 mm de água. A figura 10 mostra o lisímetro montado para testes no galpão e para operação em campo.

Visando observar o comportamento do lisímetro, especialmente a variação do coeficiente de calibração e a pressão sob diferentes níveis de inflação dos travesseiros hidráulicos, ensaios de calibração variando o volume de fluido nos travesseiros hidráulicos foram promovidos. Para tanto, procedeu-se calibrações com retiradas sucessivas de volume de 1 dm^3 dos travesseiros hidráulicos. Partiu-

se com os travesseiros com um volume inicial armazenado de 25 dm^3 ; fez-se uma primeira calibração; retirou-se 1 dm^3 e procedeu-se outra calibração, e assim seguiu-se até o nível de inflação dos travesseiros de 15 dm^3 . O mesmo teste foi feito em campo.

Outro teste realizado em galpão foi a calibração em quadrantes, que visa avaliar a estabilidade do tanque sobre o sistema de pesagem hidráulica sob diferentes posições de concentração de carga, bem como as respostas das Leituras no manômetro.



Figura 10. Lisímetro montado em galpão para testes preliminares (esq.); Lisímetro pré-montado em campo, plantado com capim pangola (dir.).

3.7 Métodos de estimativa da ETo

Para os métodos de Penman-Monteith, Penman-FAO e Penman-1963, a evapotranspiração foi calculada usando o software DAILY-ET , desenvolvido pela Cranfield University, Inglaterra . Os parâmetros mínimos necessários ao cálculo são: latitude e longitude, temperaturas máxima e mínima, umidade relativa do ar, velocidade do vento duração de horas de sol. Para os demais foi montada uma planilha em excel. Informações mais pormenorizadas sobre os métodos empregados podem ser colhidas em Pereira et al. (1997).

a) Método de Thornthwaite modificado por Camargo

$$ET_o = ETP_p \cdot CORR$$

ETP_p = evapotranspiração tabular para um fotoperíodo de 12 horas em função da temperatura média (mm dia⁻¹);

CORR = fator de correção da ETP_p em função da latitude.

b) Método de Camargo

$$ET_o = F \cdot Q_o \cdot T$$

F = fator de ajuste em função da temperatura média local;

Q_o = radiação solar extraterrestre diária (mm dia⁻¹);

T = Temperatura média diária (°C).

c) Método de Makkink

$$ET_o = 0,61 \cdot W \cdot R_s - 0,12$$

W = fator de ponderação da temperatura média diária;

R_s = radiação solar em equivalente de evaporação (mm dia⁻¹).

d) Método FAO da radiação solar

$$ET_o = c \cdot W \cdot R_s$$

c = parâmetro em função da umidade relativa do ar e da velocidade do vento.

e) Método de Jensen-Haise

$$ET_o = R_s (0,0252 T + 0,078)$$

f) Método de Hargreaves-Samani-1985

$$ET_o = 0,0023 Q_o (T_{max} - T_{min})^{0,5} (T + 17,8)$$

T_{max} = temperatura máxima (°C);

T_{min} = temperatura mínima (°C).

g) Método FAO de Blaney-Criddle

$$ET_o = a + b p (0,46 T + 8,13)$$

a = fator dependente da umidade relativa do ar (%) e da razão de insolação;

b = fator dependente da umidade relativa do ar (%), da razão de insolação e da velocidade do vento a 2 m de altura ($m s^{-1}$);

p = percentagem do total de fotoperíodo médio diário sobre o total de fotoperíodo anual.

h) Tanque Classe A-FAO

$$ET_o = ECA K_p$$

ECA = evaporação do Tanque Classe A, ($mm d^{-1}$);

K_p = coeficiente de tanque = 0,75.

A adoção deste coeficiente foi feita com base nas medidas de velocidade média diária do vento e umidade relativa média diária da estação agrometeorológica e no raio de bordadura seguindo as recomendações da FAO.

Araújo (2001), Blackburn (2002) e Santiago (2002) adotaram o mesmo Kp em trabalhos na mesma localidade.

i) Tanque Experimental

$$ET_o = ETE K_{pe}$$

ETE = evaporação do Tanque Experimental, em mm d⁻¹;

K_{pe} = coeficiente de tanque do Tanque Experimental = 0,758.

Estudos preliminares sobre este tanque em diversas regiões indicaram um coeficiente médio de tanque (Kp) de 0,758, o qual foi usado no presente estudo.

j) Método de Penman-1963

$$ET_o = [(\Delta / \gamma) R_n + E_a] / (\Delta + \gamma) + 1$$

Δ = declividade da curva pressão de vapor-temperatura (kPa °C⁻¹);

γ = constante psicrométrica (kPa °C⁻¹);

R_n = radiação líquida (mm dia⁻¹);

E_a = poder evaporante do ar;

l) Método de Penman Monteith

$$ET_o = \left\{ \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma^*} \right) (R_n - G) + \frac{1}{\lambda} + \left[\frac{\gamma}{\Delta + \gamma^*} \right] \left[\frac{900}{T + 273} \right] V_2 (e_s - e_a) \right\}$$

γ^* = constante psicrométrica modificada (kPa °C⁻¹);

G = fluxo de calor no solo (MJ m⁻² dia⁻¹);

λ = calor latente de vaporização (MJ kg⁻¹);

V₂ = velocidade do vento a 2 m de altura (ms⁻¹);

e_s = pressão de saturação do vapor do ar (kPa);

e_a = pressão atual de vapor do ar (kPa);

3.8 Avaliação da performance dos métodos de estimativa da ETo

A performance dos modelos de previsão evapotranspirométrica foi avaliada estatisticamente com o uso de regressão linear simples, coeficiente de correlação (r), erro padrão da estimativa (EPE), índice de concordância (d) e índice de desempenho (c).

O grau de associação dos valores estimados com os valores observados é dado pelo coeficiente de correlação (r). O erro padrão da estimativa é calculado por:

$$EPE = \{ \sum (y - \hat{y}) / (n - 1) \}^{1/2}$$

sendo EPE = erro padrão da estimativa;
 y = evapotranspiração medida;
 \hat{y} = evapotranspiração estimada;
 n = número de dados observados.

Para avaliar matematicamente a aproximação entre os valores estimados e observados foi usado o índice de concordância (d) proposto por Willmott (1981). Este índice é dado pela seguinte expressão:

$$d = 1 - \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y} + y_i - \bar{y})^2} \right\}$$

sendo d = índice de concordância;
 \hat{y}_i = valores de evapotranspiração estimados pela regressão;
 y_i = valores observados de evapotranspiração;
 \bar{y} = média dos valores observados.

Camargo & Sentelhas (1997) propuseram o índice (c) para avaliar o desempenho dos modelos quanto à confiança da estimativa em relação ao

método padrão. Este índice é dado pelo produto entre o coeficiente de correlação e o índice de concordância, ou seja:

$$c = r \times d$$

As categorias de desempenho dos métodos através do índice (c) são mostradas na tabela 2.

Tabela 2. Categorias de desempenho dos métodos de estimativa de evapotranspiração segundo o índice (c).

| Valor de "c" | Desempenho |
|--------------|------------|
| >0,85 | Ótimo |
| 0,76 – 0,85 | Muito bom |
| 0,66 – 0,75 | Bom |
| 0,61 – 0,65 | Mediano |
| 0,51 – 0,60 | Sofrível |
| 0,41 – 0,50 | Mal |
| ≤0,40 | Péssimo |

Fonte: Camargo & Sentelhas (1997).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Considerações de projeto e de operação do lisímetro

Com relação a disposição dos travesseiros extremos, o recuo divergente de 0,125 m em relação aos pontos de distribuição isométrica, em que todos receberiam a mesma carga, permite melhorar a condição de equilíbrio, tornando o tanque mais estável uma vez que os pontos de apoio extremos ficam mais distantes do centro de carga. As considerações sobre a estabilidade do tanque são tratadas mais adiante no tópico seguinte.

Um reflexo negativo do ponto de vista da resistência dos materiais, devido ao distanciamento dos traveseiros foi a flexão da chapa. No projeto foi admitido que a chapa seria capaz de distribuir uniformemente a carga do tanque entre os três traveseiros. Nos testes preliminares (no galpão) praticamente não houve celamento. No entanto após a instalação em campo, sob plena carga de solo e de água (umidade na capacidade de recipiente) foi notificada uma deformação (celamento) da ordem 13 mm no centro da chapa. Isto se deveu ao aumento na carga do tanque na ordem de 1000 kg para operação em campo, o qual passou a exercer um esforço na chapa de 3500 kgf, gerando uma concentração exagerada no traveseiro central.

O celamento da chapa provocou uma inflação diferenciada no traveseiro central, e conseqüentemente na área de contato chapa-traveseiro. Não foi avaliado até que ponto esta deformação podia afetar as medições lisimétricas. Mas como medida de minimização da flexão na chapa, recomenda-se, em projetos de melhoramento ou de construção de novos lisímetros de mesma concepção, a colocação de vigas em seção U (viga virada) dispostas na chapa transversalmente ao eixo longitudinal dos traveseiros hidráulicos ou a utilização de chapas de maior espessura.

A área de solo do tanque exposta à atmosfera é de 2,086 m² e se encontra dentro das recomendações sugeridas por Aboukhaled et al. (1982) que é de no mínimo 2 m² para lisímetros destinados a medir a evapotranspiração de referência. No entanto, parece haver uma tendência ao emprego de lisímetros com área inferior a mínima indicada, que se deve, entre outras razões, possivelmente a questões financeiras. No Sertão de Pernambuco, Freitas (1994), Costa (1999) e Silva (2000) empregaram lisímetros de pesagem hidráulica com 1,25; 1,79 e 1,79 m² de solo.

Uma característica importante do lisímetro é a sua área de borda relacionada à área superficial. A área de borda compreende o espaço sem solo e

sem vegetação. Neste caso, é a área compreendida pela espessura das paredes do tanque e da estrutura de contenção e o espaço vazio (folga) entre elas. A espessura da parede da estrutura de contenção na porção que aflora a superfície do solo tem 0,05 m e o espaço vazio entre a parede do tanque e a parede da estrutura de contenção é de 0,03 m. A espessura da parede do tanque é desprezível. Portanto a espessura de borda (E) é 0,08 m.

A área de borda do lisímetro é dada pelo produto de E e do perímetro da borda (P), sendo este, para um círculo, dado por:

$$P = 2 \times \pi \times r$$

sendo r: raio da estrutura de contenção, igual 0,84 m.

Assim: $P = 2 \times 3,14 \times 0,84 = 5,29 \text{ m.}$

A área de borda é igual a: $E \times P = 0,08 \times 5,29 = 0,42 \text{ m}^2.$

A relação entre a área de borda e a área superficial de solo do lisímetro é:

$$0,42 \text{ m}^2 / 2,086 \text{ m}^2 = 0,20.$$

Aboukhaled et al. (1982) comenta 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. Ele relata relações desprezíveis, como em lisímetros forrados por plástico, até relações de 0,65, como o grande lisímetro de concreto de Coshocton (EUA). Sedyama (1996) recomenda que essa relação não exceda 0,10, sob o risco de aumento na contribuição advectiva no balanço energético do lisímetro. É rara a existência de equipamentos que obedeçam todas as recomendações estruturais. Os lisímetros empregados por Freitas (1994), Costa (1999) e Silva (2000) tinham relações de 0,38; 0,48 e 0,48.

O custo de construção do lisímetro de pesagem hidráulica foi em torno de R\$ 2700,00 a R\$ 2800,00, envolvendo os componentes, a mão-de-obra, os materiais acessórios e auxiliares e custos eventuais. É um custo muito reduzido para um equipamento que tem em sua concepção de projeto uma capacidade de atingir precisões próximas daquelas obtidas com uso de dispositivos lisimétricos equipados com células de carga eletrônica. Nas calibrações de galpão o lisímetro foi capaz de detectar lâminas de até 0,095 mm.

Uma única célula de carga para 500 kg custa atualmente cerca de R\$ 2400,00 e muitos lisímetros chegam a utilizar mais de duas para operarem adequadamente. Conforme já citado neste trabalho, Miranda et al. (1999) obteve para construir um lisímetro equipado com balança eletrônica, sem levar em consideração importação e transporte, um custo de R\$ 12850,00. Isto se traduz em uma relação custo-benefício muito vantajosa ao lisímetro de pesagem hidráulica, possibilitando o emprego desses dispositivos para fins produtivos (técnicos) ou científicos, principalmente em locais e condições em que o custo de construção é um fator proibitivo.

4.2 Calibrações

Os resultados das calibrações em galpão e em campo figuram nas tabelas 3 e 4, respectivamente. Tanto na condição de galpão como na de campo o comportamento do lisímetro foi linear sob todas as condições de inflação dos travesseiros. Todos os coeficientes de determinação (R^2) foram elevados (todos na casa de 0,9999) para carregamento e descarregamento e significativos ao nível de 0,1% de probabilidade pelo teste t, indicando que as respostas lisimétricas se ajustam bem ao modelo de regressão linear.

As respostas das leituras de carregamento e de descarregamento foram altamente correlacionadas. O teste t entre leituras de carga e descarga foi

significativo a 0,1% de probabilidade, o que indica efeito de histerese insignificante, assegurando respostas confiáveis às variações de carga no tanque.

Tabela 3. Calibração em galpão do lisímetro de pesagem hidráulica para carregamento e descarregamento sob níveis de inflação dos travesseiros entre 25 e 15 dm³.

| Volume (dm ³) | Carregamento | R ² | Descarregamento | R ² |
|---------------------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|
| 25 | Y=10,65x+42,50 | 0,999*** | Y=10,50x+50,43 | 0,999*** |
| 24 | Y=10,24x+29,00 | 0,999*** | Y=9,89x+47,32 | 0,999*** |
| 23 | Y=9,79x+51,30 | 0,999*** | Y=9,46x+70,14 | 0,994*** |
| 22 | Y=9,37x+71,36 | 0,999*** | Y=9,14x+82,47 | 0,998*** |
| 21 | Y=9,09x+62,88 | 0,999*** | Y=8,89x+73,69 | 0,999*** |
| 20 | Y=8,77x+24,24 | 0,999*** | Y=8,57x+33,08 | 0,999*** |
| 19 | Y=8,37x+57,38 | 0,998*** | Y=8,25x+63,57 | 0,999*** |
| 18 | Y=7,98x+99,96 | 0,998*** | Y=7,72x+115,94 | 0,996*** |
| 17 | Y=7,99x+120,11 | 0,998*** | Y=7,65x+135,82 | 0,997*** |
| 16 | Y=7,96x+52,37 | 0,999*** | Y=7,66x+65,77 | 0,999*** |
| 15 | Y=7,72x+79,96 | 0,999*** | Y=7,35x+94,87 | 0,999*** |

*** Significativo a 0,01% de probabilidade pelo teste t.

Na tabela 5 são mostrados os coeficientes de calibração sob níveis de inflação dos travesseiros entre 25 e 15 dm³ em galpão e em campo. A medida que os travesseiros são deflacionados, o coeficiente de calibração diminui. Isto ocorre porque a área de contato chapa-travesseiro aumenta para uma mesma força de aplicação, o que incorre em uma redução de pressão. Assim, o mesmo incremento ou decremento de carga do tanque provoca uma variação de pressão nos travesseiros inversamente proporcional à área de contato. A questão da variação de pressão em função do nível de inflação é avaliada mais adiante.

Tabela 4. Calibração em campo aberto do lisímetro de pesagem hidráulica para carregamento e descarregamento sob níveis de inflação dos travesseiros entre 25 e 15 dm³.

| Volume (dm ³) | Carregamento | R ² | Descarregamento | R ² |
|---------------------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|
| 25 | Y=10,75x+20,95 | 0,998*** | Y=10,99x+14,79 | 0,996*** |
| 24 | Y=10,23x+14,05 | 0,998*** | Y=10,28x+4,81 | 0,999*** |
| 23 | y=10,51x+10,62 | 0,999*** | Y=10,00x+45,19 | 0,996*** |
| 22 | Y=10,25x+13,52 | 0,999*** | Y=10,09x+31,52 | 0,997*** |
| 21 | Y=10,13x+16,19 | 0,999*** | Y=9,70x+46,43 | 0,996*** |
| 20 | Y=10,23x+24,86 | 0,997*** | Y=10,22x+44,10 | 0,987*** |
| 19 | Y=10,44x+17,67 | 0,998*** | Y=9,97x+60,86 | 0,988*** |
| 18 | Y=10,18x+11,33 | 0,999*** | Y=9,77x+53,38 | 0,990*** |
| 17 | Y=9,71x+5,19 | 0,999*** | Y=9,79x+20,19 | 0,996*** |
| 16 | Y=9,65x+13,19 | 0,999*** | Y=9,38x+42,00 | 0,995*** |
| 15 | Y=9,58x+18,67 | 0,999*** | Y=9,28x+49,24 | 0,993*** |

*** Significativo a 0,01% de probabilidade pelo teste t.

O coeficiente médio de calibração para a condição de galpão variou de 10,54 a 7,46 mm de leitura / mm de lâmina de água aplicada ou retirada, e de 10,70 a 9,28 mm de leitura / mm de lâmina de água aplicada ou retirada para a condição de campo. Os resultados de campo revelam um comportamento muito irregular em relação às condições de galpão. As calibrações em campo produziram coeficientes de calibração que apresentaram uma tendência não muito definida. Para a faixa de volumes extraído a variação dos coeficientes de calibração em campo foi estreita (1,42 mm/mm) em relação aquela obtida em galpão (3,08 mm/mm). Os testes em galpão foram feitos sob condições de estabilidade atmosférica, onde não houve incidência direta dos raios solares sobre a chapa metálica, os travesseiros, na tubulação de condução de fluido e no arranjo de pistão de mercúrio. Sendo o local com cobertura alta e ventilado, a flutuação diária da temperatura teve possivelmente amplitude pouco pronunciada. Sob

condição de campo o coeficiente de calibração sofreu interferência direta da radiação solar e da temperatura, uma vez que o ensaio de calibração foi conduzido ao longo do dia. Foi notificada uma amplitude de variação de temperatura ao longo do período diário em que foram feitas as calibrações de mais de 12,5 °C. A figura 15 (Anexo) mostra a flutuação da temperatura nos dias em que as calibrações foram procedidas.

Tabela 5. Ensaio de calibração com retiradas progressivas de volumes dos travesseiros hidráulicos em condição de galpão e de campo.

| Volume dos travesseiros (dm ³) | Coeficiente de calibração (mm mm ⁻¹) | | Precisão (mm) | |
|--|--|-------|---------------|-------|
| | Galpão | Campo | Galpão | Campo |
| 25 | 10,54 | 10,70 | 0,095 | 0,093 |
| 24 | 9,97 | 10,19 | 0,100 | 0,098 |
| 23 | 9,48 | 10,15 | 0,105 | 0,099 |
| 22 | 9,13 | 10,06 | 0,109 | 0,099 |
| 21 | 8,90 | 9,74 | 0,112 | 0,103 |
| 20 | 8,61 | 9,94 | 0,116 | 0,101 |
| 19 | 8,22 | 9,97 | 0,121 | 0,100 |
| 18 | 7,69 | 9,94 | 0,130 | 0,101 |
| 17 | 7,68 | 9,67 | 0,130 | 0,103 |
| 16 | 7,78 | 9,38 | 0,129 | 0,107 |
| 15 | 7,46 | 9,28 | 0,134 | 0,108 |

Kruse & Neale (1989) em estudos com um lisímetro de pesagem hidráulica notificaram a influência da temperatura sobre o coeficiente de calibração e na leitura do manômetro sem mudança de carga. Detectaram mudança no coeficiente de calibração uma variação de temperatura ambiente de 1,2 °C.

O efeito da temperatura e da radiação solar é dilatativo. O aumento da temperatura ambiente e a condução de calor da chapa metálica podem ter

provocado a dilatação volumétrica no fluido nos travesseiros e principalmente na tubulação de condução de fluido, a qual ficava mais exposta ao ambiente. Isso diminui o contato travesseiro-chapa e aumenta o coeficiente de calibração. As calibrações produziram coeficientes de calibração 10,19; 9,44; 15,45; 21,29; 29,26, 25,92; 20,57 e 24,39 % superiores aos de galpão na subfaixa de 23 a 15 dm³ de volume dos travesseiros. Apenas as duas primeiras calibrações produziram coeficientes semelhantes aos de galpão (1,51 e 2,20 % superiores), que pode ter sido devido a temperatura mais amena da manhã. Uma calibração extra em campo, com o volume de travesseiros de 21 dm³, produziu um coeficiente 6,16% maior em relação a uma outra feita aproximadamente 3 horas antes com o mesmo volume.

A precisão da leitura é definida como o número indivisível de evapotranspiração, ou seja, o menor valor numérico detectável de evapotranspiração. Foi considerado que o menor número legível na escala de leitura foi igual ao menor valor plotado, ou seja, 1 mm. Assim, a precisão é obtida pelo inverso do coeficiente de calibração ($1/f$). Os ensaios de galpão forneceram precisões desde 0,095 mm com um volume de 25 dm³ a 0,134 mm, para um volume de travesseiros de 15 dm³. Em campo essa variação foi mais estreita, de 0,093 a 0,108 mm.

Todas as precisões determinadas nos ensaios foram superiores as encontradas por Dilla & Cox (1973), Nachappan et al (1970), Freitas (1994), Costa (1999), Silva (2000) e Miranda et al. (1999), que obtiveram, respectivamente, precisões de 0,25; 0,64; 0,50; 0,21; 0,29; 0,26 e 0,18 mm. Vale salientar que Silva (2000) considerou 0,5 mm como o menor número legível, que encerra em uma precisão de 0,13 mm; e que Miranda et al (1999) utilizou células de carga eletrônica para a pesagem. Bloemen (1964), Black et al. (1968) citado por Silva (2000), Gupta (1973) e Campeche (2002), tiveram precisões de 0,08; 0,02; 0,04 e 0,04 mm, respectivamente, usando equipamentos mais caros e sofisticados. Silva et al. (1999a) obtiveram precisões de até 0,01 mm em um lisímetro de célula de

carga, mas ressaltaram que as respostas das células de carga foram mais consistentes na faixa de variação entre 0,10 e 1,00 mm.

4.3 Estabilidade do tanque

O ensaio de calibração nos quadrantes tem o objetivo de avaliar o grau de sensibilidade do lisímetro a distribuição assimétrica de massa no tanque. Freitas (1994) e Costa (1999) referem-se a este teste como sendo uma simulação representativa da evapotranspiração ou drenagem assimétrica, que dificilmente ocorreria em condições de campo. O teste consistiu em carregamento seguido de descarregamento, em etapa única, de cada quadrante com uma massa equivalente a uma lâmina de água de 40 mm e verificar as leituras no manômetro. Os resultados figuram na tabela 6.

A média dos coeficientes obtidos para o 1°, 2°, 3° e 4° quadrantes para as cinco condições de inflação dos travesseiros foram, respectivamente, 12,04; 10,03; 8,86; 7,88 e 7,56 mm de leitura mm^{-1} de lâmina de água.

O erro médio posicional, é definido como sendo a relação entre a média dos coeficientes dos quadrantes e o coeficiente médio de calibração. O lisímetro apresentou para as condições de 28 dm^3 , 25 dm^3 , 22 dm^3 , 19 dm^3 e 16 dm^3 , erros médios posicionais de 0,92 %, 3,93 %, 0,67 %, 2,47 % e 1,34 %, respectivamente. Isto indica que em condições de distribuição preferencial da umidade no perfil de solo dentro do lisímetro, pode-se gerar uma variação de sensibilidade nas leituras lisimétricas em torno dos valores citados, considerando as condições de carga em que o teste foi realizado e a concepção de projeto. Freitas (1994), Costa (1999) e Silva (2000) relatam que Black et al (1968) determinam como limite tolerável até 10 % de erro posicional. Os referidos autores obtiveram 4%, 3,55 % e 2,11 % em lisímetros dotados de três travesseiros. A faixa de valores de erros posicionais obtidas permite inferir que o lisímetro opera sob condições estáveis de equilíbrio em todos os níveis de inflação testadas.

A tendência à inclinação do tanque para um dos quadrantes pode afetar as medições lisimétricas ou mesmo paralisá-las. Portanto a calibração em quadrantes pode dar sinais do tipo de condição de equilíbrio a que o lisímetro está submetido. Esta tendência foi verificada por Rodrigues (1987), em um evapotranspirômetro de pesagem hidráulica em Parnamirim-PE, e por Santos et al. (2003), em teste de funcionamento em um mini-lisímetro de pesagem hidráulica isométrico e com dois travesseiros, onde foi observada uma tendência de movimentação lateral seguida de tombamento. Estes encontraram um erro médio posicional de 21 %. Kruse e Neale (1989) também relatam em testes de um protótipo de lisímetro em laboratório a tendência ao escapamento lateral. Sugere-se, portanto para estes casos uma condição de equilíbrio instável, ou seja, uma perturbação lateral no tanque tende a afastá-lo cada vez mais do ponto inicial.

Tabela 6. Estabilidade do lisímetro sob diferentes níveis de inflação dos travesseiros.

| Quadrante | Coeficiente de calibração f (mm mm ⁻¹) | | | | |
|---------------|--|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | 28 dm ³ | 25 dm ³ | 22 dm ³ | 19 dm ³ | 16 dm ³ |
| 1° | 11,67 | 10,11 | 8,95 | 7,94 | 7,47 |
| 2° | 11,91 | 9,88 | 8,80 | 7,86 | 7,41 |
| 3° | 12,29 | 9,98 | 8,93 | 7,71 | 7,64 |
| 4° | 12,28 | 10,15 | 9,14 | 7,99 | 7,73 |
| f quadrante | 12,04 | 10,03 | 8,96 | 7,88 | 7,56 |
| f médio | 11,93 | 10,44 | 8,90 | 7,69 | 7,46 |
| Desvio (%) | 0,92 | -3,93 | 0,67 | 2,47 | 1,34 |

4.4 Área de contato entre chapa e travesseiros hidráulicos

O nível de inflação dos travesseiros hidráulicos depende diretamente do volume de fluido contido nos mesmos. Cada nível de inflação condiciona uma área de contato chapa-travesseiro. Quando preenchidos na capacidade máxima a seção transversal do travesseiro se aproxima da forma de um círculo e a área de

contato é mínima, e a medida que o nível de inflação diminui esta área varia numa proporção inversa.

Silva (2000) relata que travesseiros com volume de fluido inadequado não permitem uma área de contato constante, interferindo na resposta da pressão transmitida ao sistema de leitura. Kruse e Neale (1989) comentam que nunca haverá uma superfície de contato constante para um dado volume de fluido nos travesseiros, devendo-se procurar um conteúdo para o qual a variação da superfície de contato seja mínima.

O comportamento dessa variação foi avaliado paralelamente ao ensaio de calibração. Em cada nível de inflação dos travesseiros foi medida a pressão em metro de coluna de água (m.c.a) necessária para equilibrar a contrapressão da carga do tanque sobre os travesseiros. O gráfico A da figura 11 mostra que a resposta da pressão aos níveis de inflação se ajusta a um comportamento exponencial. Isso indica que a área de contato chapa-travesseiro, a medida que os travesseiros são deflacionados, passa a ter uma variação cada vez menor, tendendo a um valor constante. No teste, os valores de pressão começaram a apresentar diferenças próximas de um valor constante a partir de um volume de fluido dos travesseiros de 25 dm^3 (Gráfico B da figura 11), ajustando-se a uma reta, o que indica que a área de contato chapa-travesseiros tende a um valor próximo de uma variação constante.

No entanto para a faixa de carregamento e descarregamento que foi praticada nos ensaios de calibração (até 60 mm), qualquer um dos níveis de inflação dos travesseiros pode ser utilizado, uma vez que sob condições reais de operação esta faixa de carregamento e descarregamento é em torno de 10 mm no período seco. No período chuvoso, mesmo ocorrendo precipitações de maior magnitude que a faixa de calibração empregada, o sistema de drenagem aliviaria a massa de água extra adicionada pela chuva.

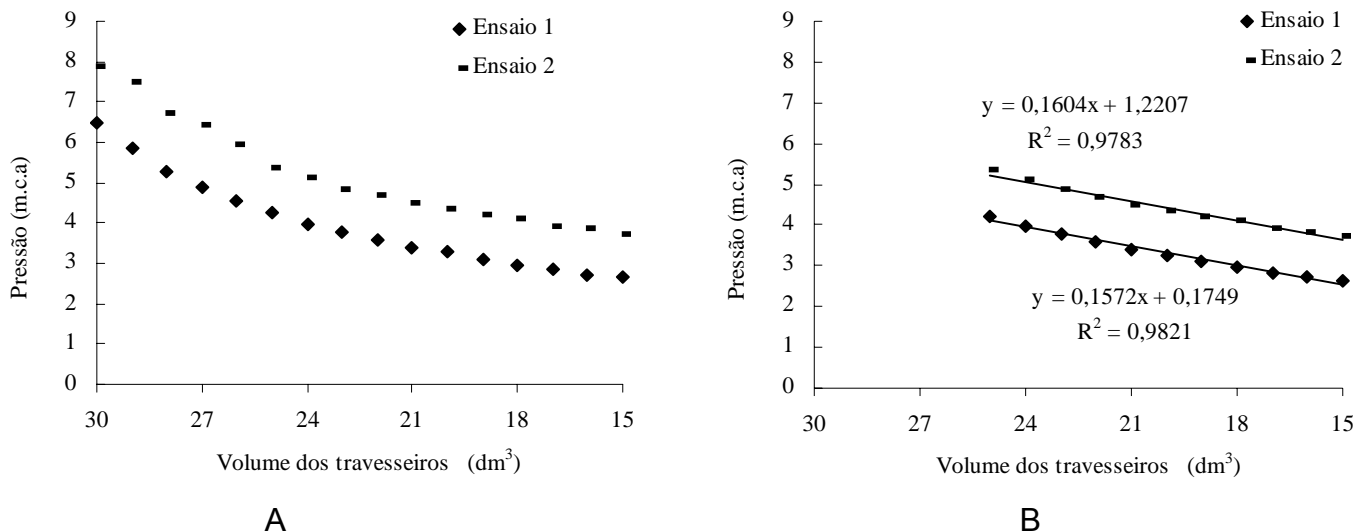


Figura 11. Distribuição da altura manométrica em função do grau de inflação dos travesseiros hidráulicos.

4.5 Desempenho dos métodos de estimativa da evapotranspiração de referência

Em anexo, nas Figuras 12a e 12b, e 13a e 13b, estão representados graficamente (reta de 45°) a evolução da ETo dos métodos empregados no período de 39 dias de observação nas escalas diária e tridial.

A tabela 7 mostra a evapotranspiração acumulada para o período estudado. Verifica-se sobrestimativas por parte dos tanques e do lisímetro. Isto pode ser atribuído ao fato de que as medidas feitas por estes métodos é uma integração do efeito dos elementos meteorológicos e das condições circundantes, o que não acontece com as equações, que se valem da premissa da inexistência de fluxo horizontal de calor.

Tabela 7. Evapotranspiração de referência média diária e acumulada em 39 dias, e desvio percentual tomando-se Penman-Monteith como padrão.

| Método | ETo média diária (mm dia ⁻¹) | ETo acumulada (mm) | Desvio (%) |
|----------------------|---|-----------------------|------------|
| Penman-Monteith | 5,08 | 198,00 | 0,00 |
| Penman 1963 | 5,15 | 200,70 | 1,36 |
| Hargreaves-Samani | 5,57 | 217,32 | 9,76 |
| Camargo | 4,43 | 172,80 | -12,73 |
| Blaney-Criddle-FAO | 5,91 | 230,38 | 16,36 |
| Thornthwaite-Camargo | 4,16 | 162,39 | -17,98 |
| Makkink | 4,10 | 159,78 | -19,30 |
| Radiação-FAO | 4,04 | 157,49 | -20,46 |
| Tanque Classe A | 6,14 | 239,43 | 20,92 |
| Penman-FAO | 6,37 | 248,60 | 25,56 |
| Jensen-Haise | 6,78 | 264,30 | 33,49 |
| Tanque Experimental | 7,39 | 249,87 | 45,62 |
| Lisímetro | 8,09 | 315,43 | 59,31 |

A tabela 8 apresenta os parâmetros estatísticos das equações de regressão linear simples, os índices de precisão, de concordância e de desempenho, em escala diária.

Os métodos derivados da equação de Thornthwaite (Thornthwaite-Camargo e Camargo) apresentaram os menores coeficientes angulares no modelo de regressão, evidenciando a baixa sensibilidade de variação dos dados de evapotranspiração em relação aos dados do método padrão.

Os desempenhos obtidos foram Sofrível para o método de Thornthwaite-Camargo e Péssimo para o método de Camargo em ambas as escalas. No entanto Camargo & Sentelhas (1997) obtiveram conceito de desempenho "Muito bom" para ambos nas condições de clima sub-tropical úmido de São Paulo, onde

foram desenvolvidos. Sentelhas & Camargo (1996) constataram que em escala mensal, nas condições de clima de São Paulo, o método de Hargreaves-Samani assim como os derivados de Thornthwaite, é também baseado na temperatura, superestimou a evapotranspiração potencial medida em lisímetros de drenagem cultivados com grama. Este fato reitera a inexistência de métodos universalmente aceitos e a necessidade de ajustes locais.

O método de Penman-Monteith tem a mesma base física do método de Penman, mais a inclusão de um termo que leva em consideração a resistência da planta a evaporação. Isto pode justificar as elevadas correlações (0,99) e aproximações (0,99) entre ambos. A ETo média diária do método de Penman-1963 sobrestimou em apenas 1,36% a ETo média do método de Penman-Monteith, enquanto que no lisímetro a sobrestimativa foi de 59,31%. Assis (1978) relacionou a evapotranspiração medida em lisímetros com a evaporação obtida pela fórmula de Penman. Ele observou que na maioria das vezes houve subestimação da evaporação e atribuiu isto à advecção local, a qual não é levada em conta pela fórmula de cálculo utilizada.

A equação de Blaney-Criddle obteve desempenho “Muito bom” para ambas as escalas, com valores de ETo bem correlacionados e concordantes. No entanto este método é questionado por muitos autores. Pereira et al (1997) relatou que embora possa o método de Blaney-Criddle ser usado para estimativa em escala menores que 30 dias, a representatividade é questionável visto que o método foi desenvolvido usando dados médios mensais. Doorenbos & Pruitt (1990) citados por Tucci (2001), não recomendaram a equação de Blaney-Criddle para regiões equatoriais onde a temperatura se mantém estável, oscilando somente as demais variáveis meteorológicas. Comentam ainda que os resultados em locais altos são duvidosos.

Dentre as equações a de Jensen-Haise foi a que respondeu mais semelhantemente ao lisímetro no modelo de regressão e a que apresentou maior

nível de sobrestimativa (33,49%). Essa equação foi desenvolvida em condições climáticas similares nos E.U.A (semi-árido do Texas), o que sugere o comportamento análogo ao lisímetro. Camargo & Sentelhas (1997) obtiveram desempenho sofrível para o referido método na condição climática de São Paulo (quente e úmido).

A adoção do K_p de 0,758 para o Tanque Experimental, sugerido por conferiu valores de E_{To} mais afastados aos do método padrão em comparação ao valores do Tanque Classe A, cujo K_p adotado foi o mesmo. Este fato se deve as diferenças de conformação entre os tanques. O Tanque Experimental apresenta menor volume de água e maior área de parede, o que implica em maior aquecimento e evaporação da água.

No período compreendido entre o 23° e 27° dia é notada uma inconsistência na flutuação dos dados medidos no lisímetro em relação aos dados das equações. É verificado um incremento da taxa diária de evapotranspiração no lisímetro não acompanhada pelos demais métodos (Figura 14, em anexo). Este fato afetou significativamente o desempenho estatístico do lisímetro visto que a seqüência de dados é muito curta para diluir o efeito de dispersão e de discordância.

O lisímetro não estava instalado sob condições apropriadas de campo. Houve dificuldade em manter as condições de suprimento de umidade à vegetação da área "fetch". Isto ocorreu em função da condição climática extrema e da incapacidade de suprimento hídrico da fonte de abastecimento, que propiciou condições de vegetação (altura e densidade) e de umidade discrepantes às do lisímetro. Deste modo, presume-se que grande parte do saldo de energia disponível da área "fetch" foi utilizada para o aquecimento do ar e do solo, sendo posteriormente transportada à superfície do lisímetro. Essa contribuição advectiva aumenta o balanço vertical de energia do lisímetro e incrementa o processo evapotranspirativo. Isto pode justificar os elevados valores diários de

evapotranspiração medidos no lisímetro.

Sediyama (1996) comenta que as diferenças de crescimento vegetativo dentro e fora do lisímetro provoca uma perturbação no movimento horizontal do ar e aumenta a turbulência sobre a cultura, o que repercute no aumento da transpiração da vegetação.

Portanto, as superestimativas fornecidas não podem ser apontadas como falha de funcionamento lisímetro em relação ao método padrão, uma vez que aqueles preconizam condições satisfatórias de suprimento hídrico, mormente os métodos com embasamento físico. Esta afirmação pode ser reforçada pelo fato dos tanques terem apresentado comportamento mais aproximado ao do lisímetro, mormente no que se refere a correlação e a ETo média diária, o que caracteriza uma condição de semelhança entre os dados evapotranspirométricos.

Silva et al. (1999b) comentam que quando as mensurações realizadas pelo lisímetro diferem da estimativa realizada por modelos com forte embasamento físico é possível que o lisimétrico não esteja representando as condições ambientais estudadas. Sob estas circunstâncias alguns autores tem preferido adotar os métodos mais refinados, como o de Penman-Monteith, como padrão (Dantas Neto, 1999; Almeida et al., 1999; Faria et al., 2000; Bastos et al., 1996). Miranda & Bleicher (2001) destacam a viabilidade da metodologia de Penman-Monteith em locais onde não se dispõe de lisímetros de pesagem.

O lisímetro é tido por muitos autores como um equipamento que mede a evapotranspiração real da cultura nele cultivada por meio de um balanço hídrico. No entanto, outros pesquisadores questionam este fato, considerando-o como um dispositivo que estima a evapotranspiração, na medida em que as condições nas quais as medições lisimétricas são realizadas, que nem sempre são representativas daquelas em que as plantas são cultivadas (Silva, 2003).

Pereira & Camargo (1989) em uma revisão crítica ao modelo de

Thornthwaite concluíram que ele não é adequado para condições de oásis, resultando em subestimação, e esta é a condição mais freqüentes sob condições experimentais. Assim as condições em que o lisímetro foi instalado estão mais próximas à condição de oásis, onde uma pequena área com suficiência de suprimento hídrico é cercada por uma grande área seca.

Outro fator que pode ter contribuído para as elevadas taxas evapotranspirométricas do lisímetro foi a relação entre a área de borda e a área superficial de solo do lisímetro, anteriormente comentada.

Tabela 8. Coeficientes estatísticos das equações de regressão linear simples e desempenho dos métodos indiretos de estimativa da ETo em 39 observações diárias segundo o índice “c” tomando-se como padrão Penman-Monteith.

| Método | $\hat{y} = a x + b$ | | | EPE (mm dia ⁻¹) | d | c | Desempenho |
|---------------------|---------------------|-------|------|--------------------------------|------|------|------------|
| | a | b | r | | | | |
| Penman-1963 | 0,94 | 0,35 | 0,99 | 0,13 | 0,99 | 0,98 | Ótimo |
| Makkink | 0,92 | -0,56 | 0,98 | 1,02 | 0,85 | 0,83 | Muito bom |
| Blaney-Criddle | 1,23 | -0,34 | 0,94 | 1,06 | 0,87 | 0,82 | Muito bom |
| Radiação-FAO | 0,90 | -0,51 | 0,97 | 1,10 | 0,83 | 0,81 | Muito bom |
| Penman-FAO | 1,29 | -0,19 | 0,99 | 1,36 | 0,81 | 0,81 | Muito bom |
| Hargreaves-Samani | 0,62 | 2,40 | 0,91 | 0,79 | 0,87 | 0,79 | Muito bom |
| Jensen-Haise | 1,54 | -1,04 | 0,98 | 1,89 | 0,73 | 0,71 | Bom |
| Thorntwaite-Camargo | 0,34 | 2,43 | 0,80 | 1,28 | 0,67 | 0,54 | Sufrível |
| Tanque Classe A | 1,12 | 0,44 | 0,70 | 1,80 | 0,71 | 0,50 | Mal |
| Tanque Experimental | 1,67 | -1,07 | 0,74 | 3,12 | 0,55 | 0,41 | Mal |
| Camargo | 0,13 | 3,78 | 0,77 | 1,28 | 0,52 | 0,40 | Péssimo |
| Lisímetro | 1,76 | -0,86 | 0,78 | 3,64 | 0,49 | 0,39 | Péssimo |

(a) e (b) coeficiente de regressão linear e intercepto; (r) coeficiente de correlação; (EPE) Erro padrão da estimativa; (d) Índice de concordância, (c) índice de desempenho.

Tabela 9. Coeficientes estatísticos das equações de regressão linear simples e desempenho dos métodos indiretos de estimativa da ETo em 13 observações tridias segundo o índice “c” tomando-se como padrão Penman-Monteith.

| Método | $\hat{y} = a x + b$ | | | EPE (mm dia ⁻¹) | D | c | Desempenho |
|---------------------|---------------------|--------|------|--------------------------------|------|------|------------|
| | A | b | r | | | | |
| Penman-1963 | 0,95 | 1,01 | 0,99 | 0,32 | 0,99 | 0,99 | Ótimo |
| Blaney-Criddle | 1,21 | -0,72 | 0,96 | 2,96 | 0,86 | 0,82 | Muito bom |
| Hargreaves-Samani | 0,62 | 7,22 | 0,95 | 2,10 | 0,86 | 0,82 | Muito bom |
| Makkink | 0,90 | -1,36 | 0,98 | 3,11 | 0,82 | 0,81 | Muito bom |
| Radiação-FAO | 0,87 | -1,20 | 0,98 | 3,33 | 0,80 | 0,78 | Muito bom |
| Penman-FAO | 1,29 | -0,46 | 0,99 | 4,17 | 0,77 | 0,77 | Muito bom |
| Tanque Classe A | 1,49 | -4,31 | 0,89 | 4,53 | 0,77 | 0,69 | Bom |
| Jensen-Haise | 1,49 | -2,39 | 0,98 | 5,63 | 0,68 | 0,67 | Bom |
| Thorntwaite-Camargo | 0,30 | 7,95 | 0,87 | 3,74 | 0,62 | 0,54 | Sufrível |
| Tanque Experimental | 2,15 | -10,55 | 0,93 | 8,71 | 0,56 | 0,51 | Sufrível |
| Lisímetro | 2,22 | -9,62 | 0,92 | 10,76 | 0,47 | 0,43 | Mal |
| Camargo | 0,10 | 11,66 | 0,79 | 3,62 | 0,49 | 0,38 | Péssimo |

(a) e (b) coeficiente de regressão linear e intercepto; (r) coeficiente de correlação; (EPE) Erro padrão da estimativa; (d) Índice de concordância, (c) índice de desempenho.

5. CONCLUSÕES

As calibrações no lisímetro produziram respostas lineares sob todas os níveis de inflação dos travesseiros. No entanto atenção especial deve ser dada a hora de leitura de forma a minimizar o efeito da variação da temperatura, devendo-se realizá-la sempre pela manhã e no mesmo horário.

O lisímetro apresentou elevada estabilidade sob todas as condições de inflação dos travesseiros testadas condicionando um equilíbrio estável. No entanto, é recomendável o vigamento (viga virada) da chapa de forma a minimizar a flexão.

O custo de construção do lisímetro é baixo, e a precisão satisfatória para escala diária, conferindo ao equipamento uma relação custo/benefício muito vantajosa em relação aos equipamentos dotados de dispositivos eletromecânicos.

O método de Penmam 1963 apresentou o melhor desempenho entre os demais testados em relação ao método padrão, dada a base física semelhante.

O lisímetro apresentou desempenho insatisfatório. As condições de umidade e de vegetação da área “fetch” foram incapazes de reduzir substancialmente a interferência advectiva, contribuindo para as elevadas taxas de evapotranspiração verificadas no lisímetro.

6. REFERÊNCIAS

ABOUKHALED, A; AFARO, A; SMITH, M. **Lysimeters**. Rome: FAO, 1982. 68p. (FAO Irrigation and drainage. Paper n° 39).

ALLEN, R.G; FISHER, D.K. Low-cost electronic weighing lysimeters. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.33, n.6, p.1823-1833, 1990.

ALLEN, R.G. et al. An update for the definition of reference evapotranspiration. **International Commission for Irrigation and Drainage Bulletin**, New Delhi, v.43, n.2, p.1-34, 1994.

ALMEIDA, H.A; KLAR, A.E; VILLA NOVA, N.A. Comparação de dados de evapotranspiração de referência estimados por diferentes métodos. **Irriga**, Botucatu, v.4, n.2, p.104-118, 1999.

ARAÚJO, J.A.C. **Análise do escoamento superficial na bacia de contribuição do perímetro irrigado da fazenda Nossa Senhora do Rosário**. 2001. 110 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Ciência do Solo) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.

ASSIS, F.N. **Uso do evapotranspirômetro no estudo de algumas relações entre evapotranspiração medida e estimada**. 1978. 69 f. Dissertação (Mestrado em Agrometeorologia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

ASSIS, F.N. Validação da equação Penman-Monteith para estimar a evapotranspiração de referência em condições brasileiras. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 9., 1995, Campina Grande. **Anais...** Campina Grande: SBA, 1995. p.63-65.

ASSIS, F.N; VERONA, L.A.F. Consumo de água e coeficiente de cultura do sorgo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 26, n. 5, p. 665-670, maio, 1991.

BASTOS, E.A; et al. Determinação dos coeficientes de cultura da alface. **Irriga**, Botucatu, v.1, n.3,p.2-7, 1996.

BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 5.ed. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 1989. 596 p.

BLACKBURN, D.M. **Efeito da drenagem subterrânea no balanço hídrossalino de um neossolo flúvico irrigado em Pesqueira -PE**. 2002. 102 f. Dissertação (mestrado em Agronomia – Ciência do Solo) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.

BLOEMEN, G.W. Hydraulic device for weighing large lysimeter. **Transactions of the ASAE**, v.7, n.3, p.297-299, 1964.

BRAGA, M.B; KLAR, A.E. Evaporação e evapotranspiração de referência em campo e estufas orientadas no sentido norte/sul e leste/oeste. **Irriga**, Botucatu, v.5, n.3, p.222-228, 2000.

CAMARGO, A.P; CAMARGO, M.B.P. Teste de uma equação simples da evapo(trans)piração potencial baseado na radiação solar extraterrestre e na temperatura média do ar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 3., 1983, Campinas. **Resumos...** Campinas: [s.n.], 1983. p.229-244.

CAMARGO, A.P; CAMARGO, M.B.P. Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. **Bragantia**, Campinas, v.59, n.2, p.125-137, 2000.

CAMARGO, A.P; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.5, n.1, p.89-97, 1997.

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 – Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba

COSTA, M.S.V. **Determinação da evapotranspiração de referência por evapotranspirômetro de pesagem hidráulica com arranjo de “pistão de mercúrio”**. 1999, 86 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Ciência do Solo) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.

COUTO, L; SANS, L.M.A. **Requerimento de água das culturas**. Sete Lagoas: Embrapa, 2002. 10 p. (Circular Técnica, 20).

DANTAS NETO, F.S. Avaliação de métodos para estimativa da evapotranspiração de referência para Mossoró-RN. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, MG., v.7, n.1, p.46-55, 1999.

DILLA, A.S; COX, L.M. An economical hydraulic weighing evapotranspiration tank. **Transaction of the ASAE**, St Joseph, v.16, n.2, p.294-295, 1973.

DOORENBOS, J; KASSAN, A.H. **Efectos del agua en al rendimiento de los cultivos**. FAO, Roma, 1979. 212 p (Riego y Drenage n. 33).

DOORENBOS, J; PRUITT, W.O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. Rome, FAO, 1977. 179 p. (FAO Irrigation and Drainage, Paper n. 24).

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro, 1997. 212p. (EMBRAPA - CNPS, 1).

FARIA, R.A. et al. Influência do método de estimativa da evapotranspiração de referência na demanda de irrigação suplementar para o milho (*Zea mays* L.), na Bacia do Rio Verde Grande (MG). **Ciência agrotécnica**, Lavras, v.24, p.187-196, dez. 2000. Edição especial.

FREITAS, J.A.G. **Evapotranspirômetro por sensor de carga hidráulica: construção, calibração e testes**. 1994. 122 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Ciência do Solo) – Universidade Federal Rural de Pernambuco. Recife.

GALVANI, E; ESCOBEDO, J.F. Balanço de energia na cultura de pepineiro em ambiente natural e protegido. **Bragantia**, Campinas, v.60, n.2, p.127-137, 2001.

GANGOPADHYAYA, M. et al. **Measurement and estimation of evapotranspiration**. World Meteorological Organization, Geneva, 1966. 121 p. (WMO Tech. note no. 83 – no. 201, Tp 105).

GOMIDE, R.L; OLIVEIRA, C.S.G; FACCIOLI, G.G. Protótipo de um lisímetro de pesagem automático para estudos em casa de vegetação. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.4, n.1, p.61-68, 1996.

GUPTA, R.K. An economical hydraulic lysimeter – construction and calibration. **Journal Indian Society Soil Science**, v.21, n.4, p.377-381, 1973.

HARGREAVES, G.H. **Disponibilidade e deficiências de umidade para a produção agrícola no Ceará, Brasil**. [S.l.].Utah State University. 1973. p.8-9.
Apostila

HOWELL, T.A; McCORMICK, R.L; PHENE, C.J. Desing and instalation of large weighing lysimeters. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.28, n.117, p.106-120, 1985.

JENSEN, M.E. Consumptive use of water and irrigation water requirements. **American Socety Civil Engineer**, New York, 215 p. 1973.

KLAR, A.E. **A água no sistema solo-planta-atmosfera**. São Paulo: Nobel, 1988. 408 p.

KRUSE, E.G; NEALE, C.M.U. Sources of Error in Hidraulic Weighing Lysimeter Mesureaments. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, v.32, n.1, p.81-96, 1989..

McMILLAN, W.D; PAUL, H.A. Floating lysimeter. **Agricultural Engineer**, Bedford, v.42, p.498-9, 1961.

MENDONÇA, J.C; et al. Comparação entre o método lisimétrico e métodos indiretos para a estimativa da evapotranspiração de referência na região Norte Fluminense, RJ. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 11., 2001, Fortaleza - **Anais...** Fortaleza: [s.n.], 2001. p.48-52.

MIRANDA, F.R; BLEICHER, E. **Evapotranspiração e coeficientes de cultivo e de irrigação para a cultura do melão (*Cucumis melo* L.) na Região Litorânea do Ceará**. Fortaleza: Embrapa-CNPAT, 2001. 17 p. (Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 2).

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

MONTENEGRO, A.A.A. **Diagnóstico e controle da salinização em aluviões com pequena agricultura irrigada no semi-árido nordestino**. CNPq - Programa Nordeste de Pesquisa e Pós-Graduação. Relatório final de Pesquisa. UFRPE, Recife-PE, 2001. 118 p.

MOTA, F.S. **Meteorologia agrícola**. 6 ed. São Paulo: Nobel, 1983. 376 p.

NACHAPPAN, K.M; et al. A low cost hydraulic lysimeter for determination of consuptive use requirements of field crops and outhier studies. **The Madras Agricultural Journal**, n.2, p.415-420. 1970.

OMETTO, J.C. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo, Agronômica Ceres, 1981. 440 p.

PEREIRA, A.R.;CAMARGO, A,P. An analysis of the cristicism of Thornthwaite's equation for estimating potential evapotranspiration. **Agricultural for Meteorology**, Amsterdam, v.4, p.149-157, 1989.

PEREIRA, A.R; VILLA NOVA, N.A; SEDIYAMA, G.C. **Evapo(trans)piração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183 p.

ROCHA, O.C; GUERRA, A.F; AZEVEDO, H.M. Ajuste do modelo Chistiassen-Hargreaves para estimativa da evapotranspiração do feijão no cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.7, n.2, p.263-268, 2003.

RODRIGUES, J.J.V. Construção e testes preliminares de um evapotranspirômetro de célula de carga hidráulica. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. 1987, Campinas. **Anais...** Campinas: SBCS, 1987. p 68.

SANTIAGO, F. S. dos. **Efeito do manejo da irrigação na salinidade e umidade de um neossolo flúvico, com a cultivar de repolho midori (*Brassica oleracea* var. capitata) no município de Pesqueira-PE.** 2002, 84 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Ciência do Solo) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.

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., 2003, Curitiba. **Anais...** Porto Alegre: ABRH, 2003.

SEDIYAMA, G.C. Estimativa da evapotranspiração: histórico, evolução e análise crítica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.4, n.1, p.1-12, maio, 1996.

SENTELHAS, P.C; CAMARGO, A.P. Equação para a estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, baseada no método de Hargreaves-1974. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.4, p.77–78, 1996.

SILVA, F.C. et al. Uso de dispositivos lisimétricos para medida da evapotranspiração de referência. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.7, n.1, p.19-23, 1999b.

SILVA, F.C; FOLEGATTI, M.V; MAGGIOTTO, S.G. Análise do funcionamento de um lisímetro de pesagem com célula de carga. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.7, n.1, p.53-58, 1999a.

SILVA, L.D.B. **Evapotranspiração do capim tanzânia (*Panicum maximum* Jacq.) e grama batatais (*Paspalum notatum* Flugge.) utilizando o método do balanço de energia e lisímetro de pesagem.** 2003, 93 f. Tese (Doutorado em Agronomia – Irrigação e drenagem) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

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.** 2000, 95 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Ciência do Solo) Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.

SOARES, A.J. **Efeitos de três lâminas de irrigação e de quatro doses de potássio via fertirrigação no meloeiro em ambiente protegido.** 2001. 67 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Irrigação e drenagem) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

SOARES, A.A. et al. Evapotranspiração de referência e precipitação provável no Estado de Minas Gerais visando a elaboração de projetos de irrigação. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.18, n.4, p.14-28, 1999.

STONE, L. F; SILVEIRA, P. M. **Determinação da evapotranspiração para fins de irrigação.** Goiânia: EMBRAPA-CNPAP, 1995. 49p. (Documentos, 55).

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação.** 2.ed. Porto Alegre: UFRGS, , 2001. 943 p.

VILLAGRA, M.M. et al. **Difficulties of estimating evapotranspiration from the water balance equation.** *Agricultural Meteorology*, Amsterdam, v.72, p.317-325, 1995.

VILLA NOVA, N. A. **Principais métodos de estimativa de aplicação de água de irrigação**. Piracicaba: ESALQ, 1987. 22 p.

VILLA NOVA, N.A; REICHARDT, K. **Evaporação / evapotranspiração de um sistema e suas relações com o meio ambiente**. Rio de Janeiro: ABRH,1989. p.145-197 (Coleção ABRH de recursos hídricos, 2).

WILLMOTT,C.J. On the validation of models. **Physical Geograph**, Eastern Ave, v2, p.184-194, 1981.

WITHERS, B; VIPOND, S. **Irrigação: projeto e prática**. 3.ed. São Paulo: Nobel, 1988. 339p.

ANEXOS

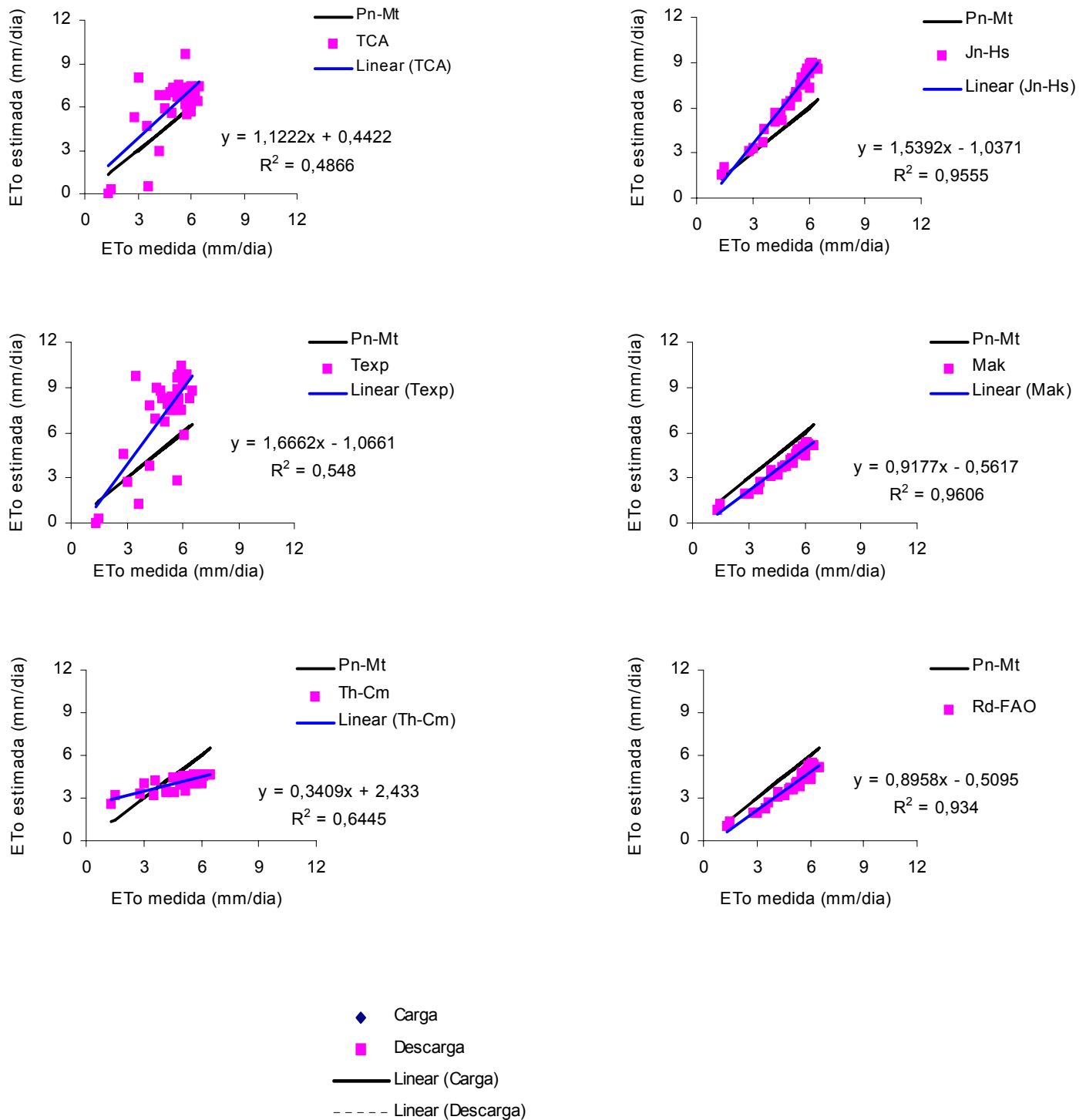


Figura 12a. ETo em escala diária pelos métodos Tanque Classe A, Jensen-Haise, Tanque Experimental, Makkink, Thorntwaite-Camargo e Radiação solar-FAO em relação ao método de Penmam-Monteith.

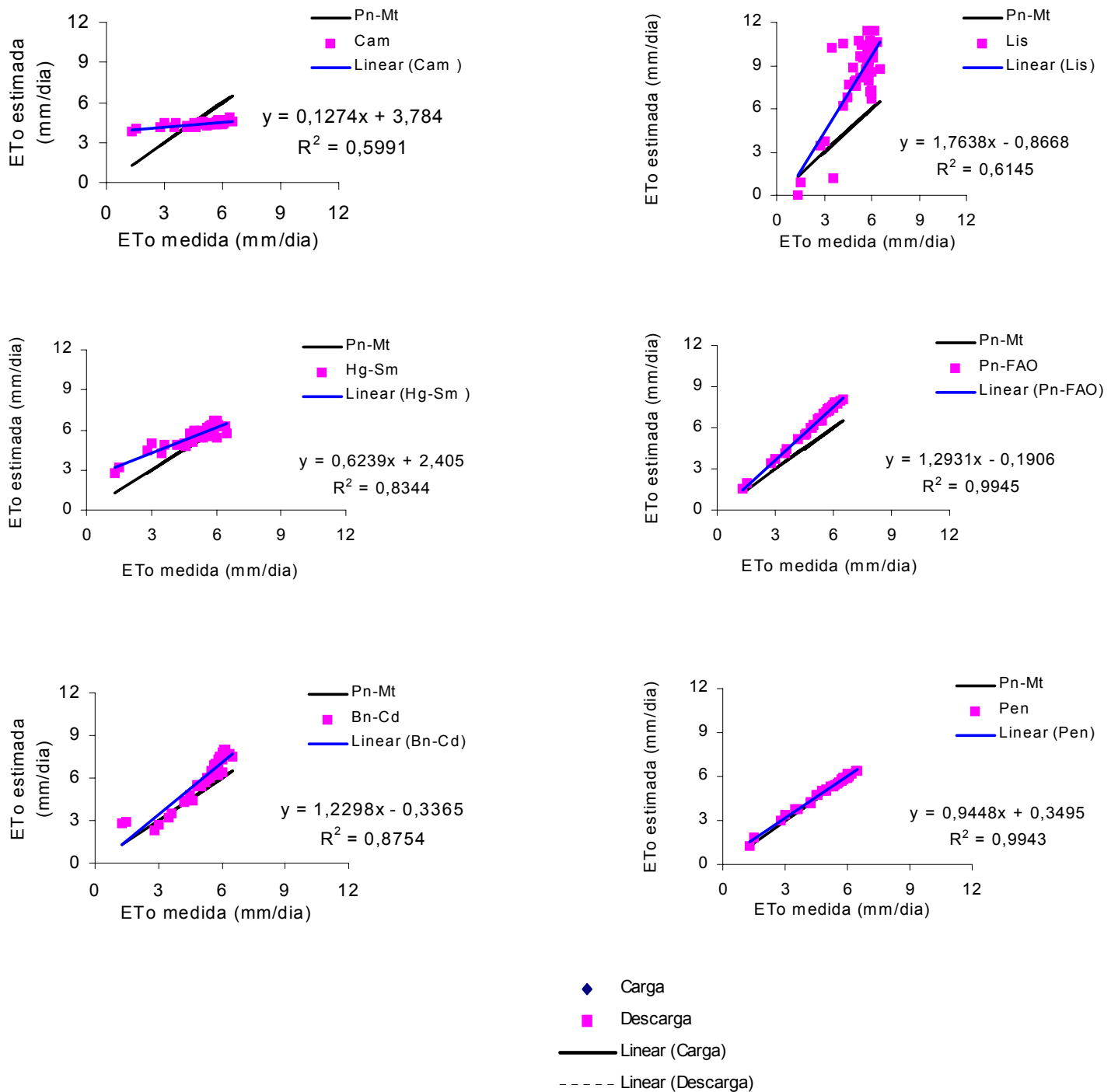


Figura 12b. ETo em escala diária pelos métodos Camargo, Lisímetro, Hargreaves-Samani, Penman-FAO, Blaney-Criddle e Penman-1963 em relação ao método de Penman-Monteith.

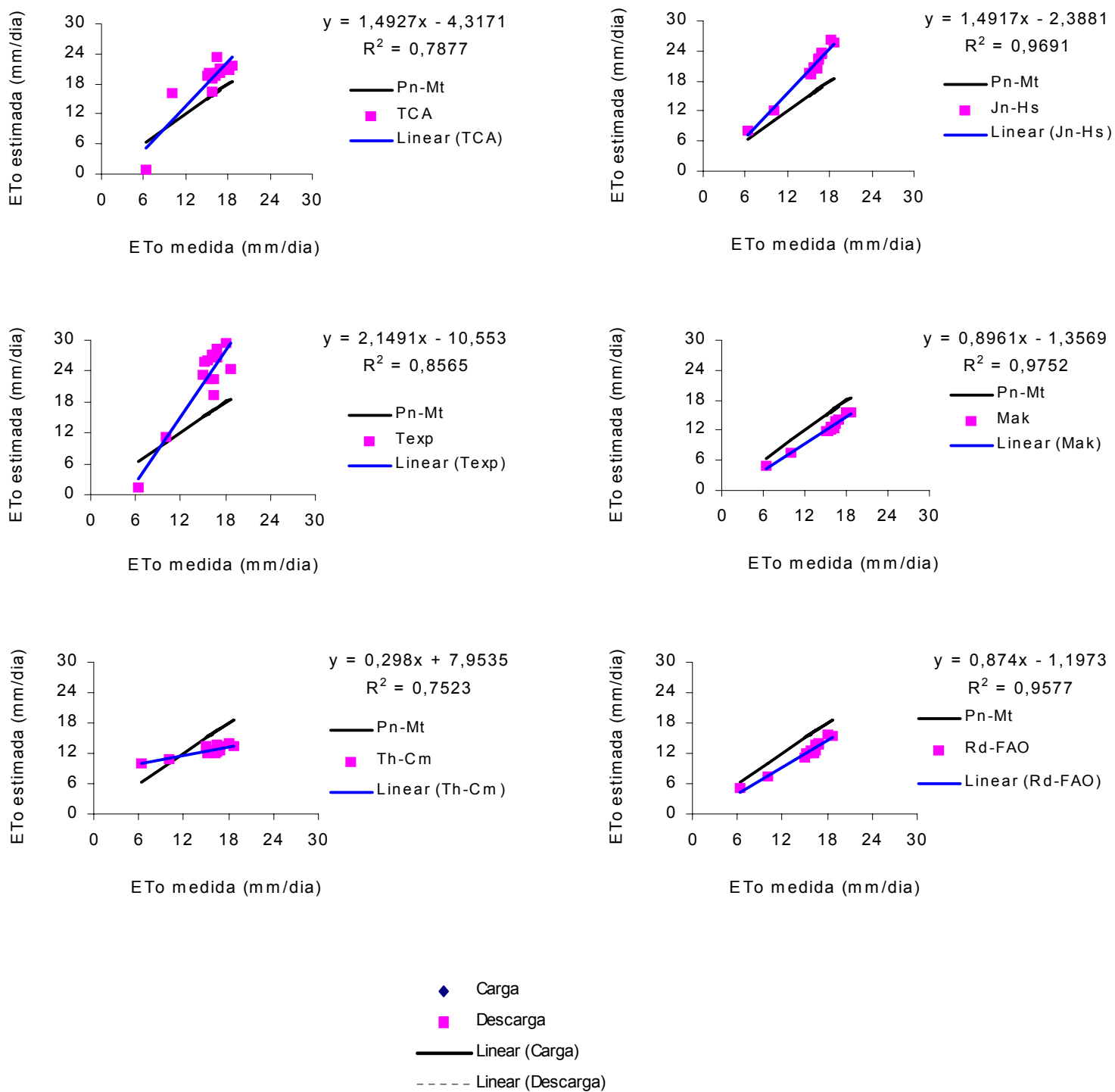


Figura 13a. ETo em escala tridial pelos métodos Tanque Classe A, Jensen-Haise, Tanque Experimental, Makkink, Thorntwaite-Camargo e Radiação solar-FAO em relação ao método de Penman-Monteith.

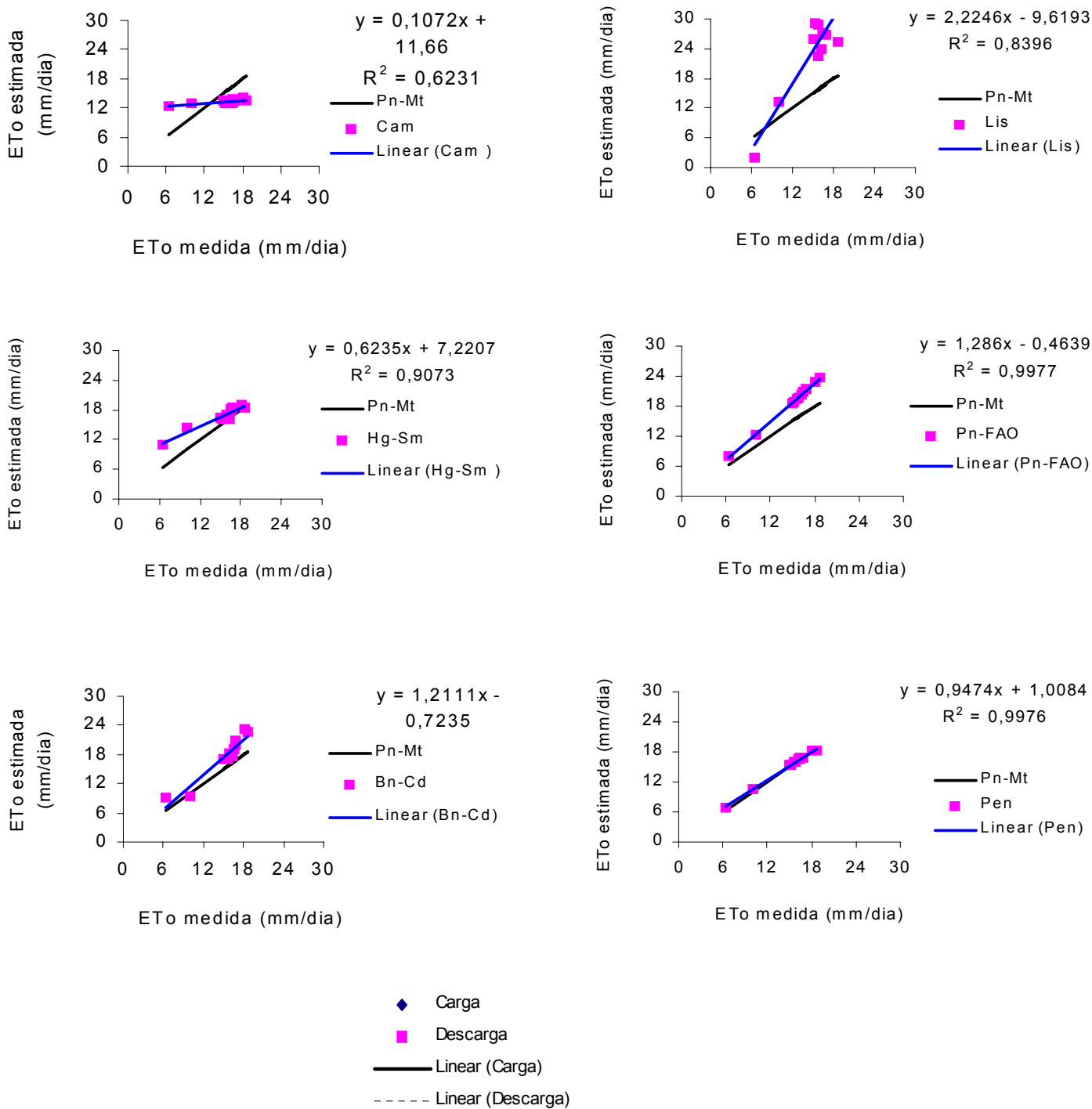


Figura 13b. ETo em escala diária pelos métodos Camargo, Lisímetro, Hargreaves-Samani, Penman-FAO, Blaney-Criddle e Penman-1963 em relação ao método de Penmam-Monteith.

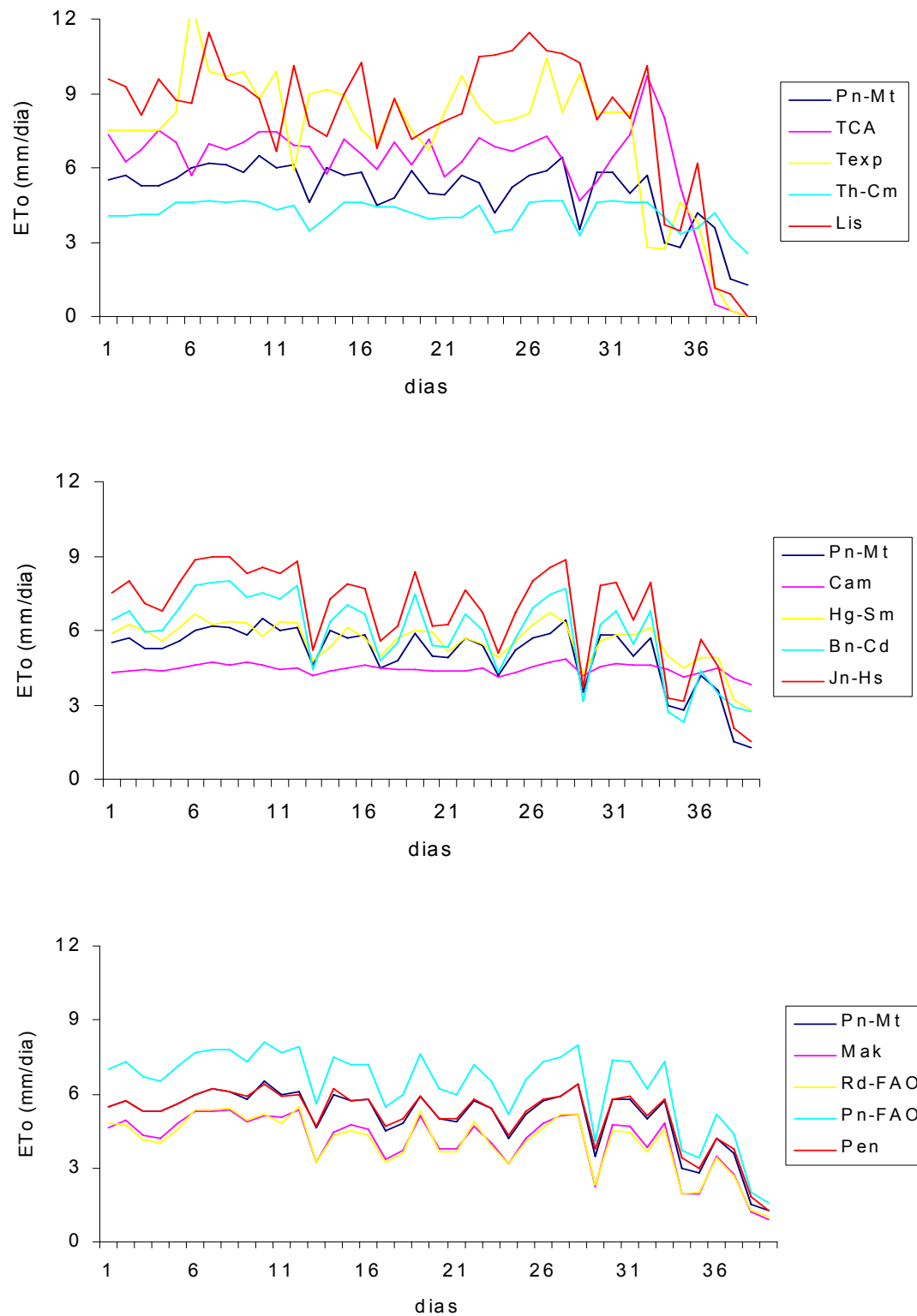


Figura 14. Evapotranspiração de referência diária no período de 28/11/03 a 19/01/04. Nos dias 03-04 e 26-30/12/03, 05-06 e 13-14/01/04 não houve medidas.

Tabela 10. Variáveis agrometeorológicas medidas na estação automática no

período de 28/11/03 a 19/02/04 (médias diárias).

| | Velocidade do vento a 2 m (m/s) | Radiação solar (MJ/m ²) | Temperatura do ar (°C) | | | Umidade relativa do ar (%) | | |
|----------|---------------------------------------|---|------------------------|-------|-------|----------------------------|-------|-------|
| | | | média | max. | min. | média | max. | min. |
| 28/11/03 | 0,87 | 26,01 | 24,94 | 32,81 | 17,87 | 54,52 | 81,30 | 22,36 |
| 29/11/03 | 0,69 | 27,48 | 25,16 | 34,10 | 17,31 | 56,44 | 79,80 | 27,21 |
| 30/11/03 | 0,85 | 24,11 | 25,39 | 33,47 | 18,27 | 58,47 | 82,10 | 29,88 |
| 01/12/03 | 1,00 | 23,50 | 25,08 | 32,35 | 18,96 | 56,11 | 82,40 | 24,72 |
| 02/12/03 | 0,84 | 26,61 | 25,99 | 34,36 | 18,90 | 56,64 | 79,30 | 27,85 |
| 05/12/03 | 0,64 | 29,12 | 26,50 | 35,96 | 18,24 | 51,87 | 78,10 | 22,10 |
| 06/12/03 | 0,86 | 28,86 | 27,14 | 35,26 | 19,89 | 48,93 | 77,30 | 18,77 |
| 07/12/03 | 0,76 | 29,29 | 26,71 | 35,10 | 18,86 | 48,93 | 77,80 | 18,77 |
| 08/12/03 | 0,75 | 26,70 | 27,10 | 35,59 | 19,96 | 52,57 | 76,80 | 20,63 |
| 09/12/03 | 1,26 | 28,17 | 26,49 | 34,46 | 20,99 | 54,20 | 74,10 | 26,12 |
| 10/12/03 | 0,98 | 28,17 | 25,52 | 34,17 | 17,14 | 55,25 | 82,10 | 24,79 |
| 11/12/03 | 0,83 | 29,55 | 25,84 | 34,16 | 17,74 | 52,94 | 81,80 | 21,93 |
| 12/12/03 | 1,24 | 18,66 | 24,02 | 31,45 | 21,09 | 65,50 | 80,20 | 35,13 |
| 13/12/03 | 0,99 | 25,06 | 25,19 | 32,11 | 19,83 | 56,96 | 82,40 | 27,65 |
| 14/12/03 | 0,78 | 26,35 | 26,02 | 34,63 | 19,23 | 55,27 | 82,50 | 21,27 |
| 15/12/03 | 1,03 | 25,32 | 26,45 | 34,10 | 21,15 | 58,39 | 79,00 | 29,31 |
| 16/12/03 | 0,93 | 18,84 | 25,73 | 31,72 | 21,32 | 58,53 | 77,90 | 31,97 |
| 17/12/03 | 0,74 | 21,00 | 25,64 | 33,73 | 20,19 | 57,20 | 80,30 | 22,99 |
| 18/12/03 | 0,77 | 28,51 | 25,43 | 33,87 | 18,60 | 54,97 | 81,80 | 20,63 |
| 19/12/03 | 0,93 | 21,34 | 25,08 | 33,83 | 18,70 | 59,07 | 80,20 | 26,78 |
| 20/12/03 | 0,94 | 21,43 | 25,12 | 31,78 | 20,46 | 56,41 | 79,60 | 30,97 |
| 21/12/03 | 0,92 | 26,27 | 25,12 | 33,50 | 19,73 | 54,16 | 77,30 | 26,75 |
| 22/12/03 | 0,85 | 25,49 | 25,46 | 34,46 | 17,87 | 56,59 | 82,20 | 24,99 |
| 23/12/03 | 1,01 | 27,04 | 26,33 | 33,60 | 20,53 | 57,40 | 76,80 | 29,77 |
| 24/12/03 | 0,93 | 27,30 | 26,91 | 35,26 | 19,99 | 54,82 | 75,20 | 22,53 |
| 25/12/03 | 0,91 | 26,70 | 26,85 | 35,00 | 20,89 | 51,00 | 73,90 | 21,20 |
| 31/12/03 | 0,86 | 18,32 | 23,84 | 31,15 | 20,16 | 71,56 | 87,40 | 36,72 |
| 01/01/04 | 0,93 | 23,76 | 24,38 | 32,12 | 18,77 | 63,66 | 84,40 | 34,46 |
| 02/01/04 | 0,67 | 26,78 | 25,97 | 34,70 | 19,03 | 56,63 | 82,80 | 27,51 |
| 03/01/04 | 0,67 | 27,91 | 26,78 | 35,49 | 18,11 | 53,22 | 80,30 | 24,16 |
| 04/01/04 | 0,96 | 28,08 | 27,56 | 36,19 | 21,32 | 53,45 | 76,10 | 21,20 |
| 07/01/04 | 0,79 | 13,31 | 23,76 | 28,64 | 20,56 | 55,63 | 80,00 | 26,98 |
| 08/01/04 | 1,01 | 26,18 | 25,99 | 33,48 | 21,09 | 69,37 | 78,90 | 54,11 |
| 09/01/04 | 0,96 | 25,92 | 26,69 | 34,07 | 20,96 | 60,82 | 82,40 | 29,98 |
| 10/01/04 | 0,83 | 21,34 | 26,19 | 34,03 | 20,66 | 56,99 | 80,50 | 29,24 |
| 11/01/04 | 0,81 | 26,52 | 26,10 | 34,20 | 19,10 | 56,80 | 80,60 | 29,47 |
| 12/01/04 | 0,53 | 11,32 | 25,12 | 31,49 | 21,09 | 61,31 | 83,20 | 30,80 |
| 15/01/04 | 0,46 | 11,58 | 23,44 | 29,33 | 20,23 | 74,54 | 89,00 | 48,83 |
| 16/01/04 | 0,51 | 19,96 | 24,38 | 29,84 | 19,50 | 78,11 | 87,40 | 53,78 |
| 17/01/04 | 0,44 | 15,55 | 25,44 | 30,99 | 21,16 | 73,74 | 89,30 | 50,26 |
| 18/01/04 | 0,22 | 7,60 | 23,24 | 25,79 | 21,09 | 70,37 | 83,10 | 50,05 |
| 19/01/04 | 0,46 | 5,96 | 21,68 | 24,10 | 20,26 | 80,94 | 85,80 | 73,20 |

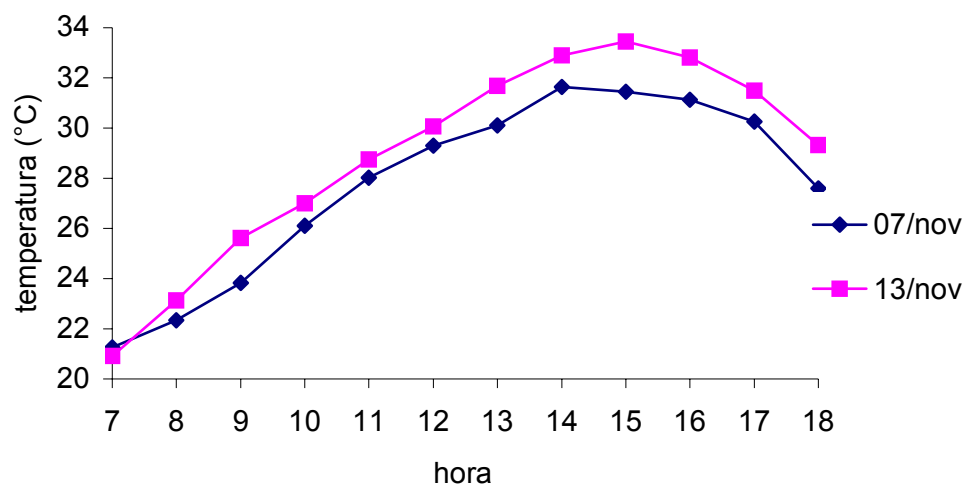


Figura 15. Flutuação horária da temperatura ao longo dos ensaios de calibração em campo em duas datas.