



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SECRETARIA DA EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL BAIANO - *CAMPUS* GUANAMBI

ANGEL RICARDO CAPORALE

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UMA FERRAMENTA PARA  
MANEJO DE IRRIGAÇÃO**

GUANAMBI  
BAHIA – BRASIL  
2017



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SECRETARIA DA EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL BAIANO - *CAMPUS* GUANAMBI

ANGEL RICARDO CAPORALE

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UMA FERRAMENTA PARA  
MANEJO DE IRRIGAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano, *Campus* Guanambi, como parte das exigências do Curso de Mestrado Profissional em Produção Vegetal no Semiárido, para obtenção do título de Mestre Profissional.

GUANAMBI  
BAHIA – BRASIL  
2017

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do IF Baiano,  
Campus Guanambi, com dados fornecidos pelo (a) autor (a)

C246d Caporale, Angel Ricardo

Desenvolvimento e avaliação de uma ferramenta para  
manejo de irrigação / Angel Ricardo Caporale.– Guanambi, Ba.,  
2017.

45f.: il.

Dissertação (Mestrado Profissional em Produção Vegetal no  
Semiárido) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnolo-  
gia Baiano, Campus Guanambi, 2017.

Orientador(a): José Alberto Alves de Souza.

Coorientador(a): Eugênio Ferreira Coelho.

1. Engenharia de irrigação. 2. Lisímetro simplificado.  
3. Evapotranspiração de referência. 4. Método Penman-  
Monteith. I. Título.

CDU: 626.8



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SECRETARIA DA EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL BAIANO - *CAMPUS* GUANAMBI

ANGEL RICARDO CAPORALE

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UMA FERRAMENTA PARA MANEJO  
DE IRRIGAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano, *Campus* Guanambi, como parte das exigências do Curso de Mestrado Profissional em Produção Vegetal no Semiárido, para obtenção do título de Mestre Profissional.

APROVADA: 27 de julho de 2017.

**Prof. Dr. Alexandro dos Santos Brito**  
Membro da Banca – IF Baiano

**Prof. Dr. Carlos Elízio Cotrim**  
Membro da Banca – IF Baiano

**Prof. Dr. Marcelo Rossi Vicente**  
Membro da Banca – IF Norte de Minas Gerais

**Prof. Dr. José Alberto Alves de Souza**  
Orientador – IF Baiano

A Deus pelo dom da Vida!

A minha esposa Mariana, aos meus filhos Nicollas e João Ricardo  
por acreditarem nesse meu objetivo!

### **DEDICO**

Aos meus pais, Luis Angel Caporale (*in memorian*) e Vanilda Caporale (mulher  
guerreira) e ao meu irmão Wires Caporale por todo incentivo;  
A todos os professores que estiveram presentes na minha vida e contribuíram para  
minha formação.

### **OFEREÇO**

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por se fazer presente em todos os momentos da minha vida;

Ao Instituto Federal Baiano - IF Baiano, através do Programa de Pós-graduação de Mestrado Profissional em Produção Vegetal no Semiárido – MPPVS pela oportunidade e suportes concedidos para a realização do curso;

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB), pela concessão das 19 bolsas de estudos;

Ao professor, orientador Dr. José Alberto Alves de Souza, por sua capacidade, seus ensinamentos, pela oportunidade e confiança a mim depositada para a realização deste estudo;

Ao professor, Dr. Carlos Elízio Cotrim pelo incentivo, ensinamentos e considerações;

Ao Dr. Eugênio Ferreira Coelho, pesquisador da Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical pela coorientação e ensinamentos como professor da disciplina Manejo da Irrigação;

Ao Professor Dr. Marcelo Rocha dos Santos pelas valiosas sugestões apresentadas como membro da banca de qualificação;

Ao professor Dr. Alexsandro dos Santos Brito sempre disposto a contribuir e pela sua disponibilidade em participar da banca de defesa;

Ao professor Dr. Marcelo Rossi Vicente IFNMG – *Campus* Salinas pela sua disponibilidade em participar da banca de defesa e importantes sugestões;

Ao Professor Dr. Sérgio Luiz Donato IFBaiano – *Campus* Guanambi pelo incentivo;

Aos professores integrantes do MPPVS pelos conhecimentos transmitidos e apoio;

Aos colegas de turma 2015.1, Alessandre Gabriel, Alynne, Clayton, Geovane, Hélder, Jean Farley, Luzinaldo, Pablo e Varley, pela convivência e amizade;

Aos bolsistas, Cosme, Egnaldo Rone e Germano pelas contribuições nos trabalhos de campo;

Aos funcionários do Instituto Federal Baiano, *Campus* de Guanambi, Zé de Adelfício, sempre disposto a auxiliar e também ao Aparecido (Branco), Luiz Rogério, Edivaldo Nogueira e Renério Lopes, pelo apoio e pela atenção;

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

Enfim, sou grato,

Pela confiança,

Pelo incentivo nos momentos mais difíceis,

Pelo apoio constante durante a realização deste trabalho.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>11</b>
2.1	O Semiárido.....	11
2.2	Conceitos e Importância da Evapotranspiração .....	12
2.3	Evapotranspiração da cultura (ETc) .....	15
2.4	Métodos de determinação da ET <sub>0</sub> .....	16
2.4.1	Método Lisimétrico .....	16
2.4.2	Tanque evaporímetro Classe A .....	17
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>18</b>
3.1	Caracterização da área experimental .....	18
3.2	Coletas de dados meteorológicos .....	19
3.3	Descrição e funcionamento do Lisímetro Simplificado (LIS) .....	20
3.4	Construção do Lisímetro Simplificado (LIS).....	21
3.5	Instalação do Lisímetro no campo.....	23
3.6	Determinação da umidade gravimétrica no solo do Lisímetro (UG) .....	24
3.7	Determinação da Evapotranspiração de referência (ET <sub>0</sub> ).....	25
3.7.1	Método do Lisímetro Simplificado (LIS).....	26
3.7.2	Método Penman-Monteith (PM) .....	26
3.7.3	Método do tanque Classe A.....	28
3.8	Metodologia para avaliação do desempenho do Lisímetro Simplificado (LIS).....	28
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>31</b>
4.1	Desempenho do método do Lisímetro Simplificado (LIS) .....	34
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>39</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>40</b>

## RESUMO

CAPORALE, Angel Ricardo, M.Sc., Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano, *Campus* Guanambi, Julho de 2017. **Desenvolvimento e avaliação de uma ferramenta para manejo de irrigação.** Orientador: José Alberto Alves de Souza. Coorientador: Dr. Eugênio Ferreira Coelho.

Para quantificar a água necessária à irrigação de forma precisa e eficiente o sistema solo-planta-atmosfera deve ser entendido como um sistema dinâmico e integrado dos mecanismos de transporte da água. Normalmente, a quantificação do consumo de água pelas culturas, seja para projetos e/ou manejo da irrigação, é realizada com base na estimativa da evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ). Embora existam muitas metodologias disponíveis e com diversas concepções para obter-se a  $ET_0$ , para a adoção de um determinado método, é importante que se considere a praticidade, o custo e a sua eficácia. O modelo padrão para estimativa da  $ET_0$  é o de Penman-Monteith - FAO, o qual requer dados que, muitas vezes, não estão disponíveis para a maioria dos irrigantes. Portanto, em condições como estas, faz-se necessário o desenvolvimento de abordagens mais simples para se obter a  $ET_0$ . Neste sentido, o estudo foi realizado com o objetivo de determinar a evapotranspiração de referência por um método direto, de fácil construção, utilização e de baixo custo. Para tanto, buscou-se desenvolver um lisímetro simplificado e avaliar o seu desempenho no campo em relação ao método padrão Penman-Monteith - FAO. A metodologia desenvolvida trata-se de um evapotranspirômetro simplificado, denominado de LIS. A pesquisa foi realizada na área experimental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano, *Campus* Guanambi – BA. A avaliação de desempenho foi realizada com os valores médios de  $ET_0$  de períodos diários, de três, cinco e sete dias, referentes a 90 dias de observações, obtidas de uma estação meteorológica automática e pelo Lisímetro simplificado (LIS). Os dados foram submetidos à análise de regressão linear e a avaliação foi baseada no erro padrão da estimativa (EPE) e nos índices de concordância “d” e de desempenho “c”. De acordo com os resultados obtidos, o LIS teve desempenho classificado como muito bom e superestimou a  $ET_0$  obtida por PM em  $0,30 \text{ mm d}^{-1}$ , em média, apresentando boas condições de funcionamento e permitindo a obtenção de medidas de evapotranspiração em concordância com as estimativas realizadas pelo método PM.

**Palavras-chave:** lisímetro, evapotranspiração de referência, Penman-Monteith, sucção do solo.

## ABSTRACT

CAPORALE, Angel Ricardo, M.Sc., Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano, *Campus* Guanambi, Julho de 2017. **Development and evaluation of a tool for irrigation management.** Adviser: José Alberto Alves de Souza. Co-adviser: Dr. Eugênio Ferreira Coelho.

In order to quantify the water required for irrigation in a precise and efficient manner the soil-plant-atmosphere system must be understood as a dynamic and integrated system of water transport mechanisms. Typically, to quantify the crop water consumption, either for irrigation projects and/or irrigation management, it is performed based on estimated reference evapotranspiration ( $ET_0$ ). Although, there are many methodologies available, with different conceptions to obtain the  $ET_0$ , the choose of any method must to consider practicality, cost and effectiveness. The standard model for estimating  $ET_0$  is that of Penman-Monteith - FAO, which requires data that is often not available to most irrigators. So, in conditions such as these, it is necessary to develop simpler approaches to obtain  $ET_0$ . In this sense, the study was carried out with the objective of determining reference evapotranspiration by a direct method, easy to construct, to use and with low cost. Aiming to do this, a simplified lysimeter was developed and its performance was evaluated in the field, taking the method of Penman-Monteith (PM) as reference. The methodology developed is a simplified evapotranspirometer, called SIL. The research was carried out in the experimental area of the Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano, Guanambi *Campus*. The performance of the simplified lysimeter was evaluated with mean  $ET_0$  for periods of one, three, five and seven days, referring to 90 days of observations, obtained from an automatic meteorological station and by the Simplified Lysimeter (SIL). The data were submitted to linear regression analysis and the performance was made based on standard error of estimation (SEE) and concordance "d" and performance "c" indexes. According to the results obtained, the SIL had a very good performance and overestimated the  $ET_0$  obtained by PM at  $0.30 \text{ mm d}^{-1}$ , on average, showing good operating conditions and allowing to obtain evapotranspiration measurements in agreement with the PM method.

**Keywords:** lysimeter, reference evapotranspiration, Penman-Monteith, soil suction.

## 1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural fundamental para a atividade agrícola e é imprescindível para o crescimento e desenvolvimento vegetal. Aproximadamente 70% de toda a água captada de fontes hídricas no mundo é utilizada para irrigação, enquanto as atividades industriais consomem 20% e o uso doméstico 10% (ANA, 2014).

Um terço da superfície da Terra é constituída de regiões áridas e semiáridas, onde concentra mais de dois terços da população pobre e rural. Nessas áreas, é evidente a escassez de recursos hídricos, que constituem, sem dúvida, um fator de limitação ao desenvolvimento agrícola de uma região (DESCHEEMAEKER et al., 2010).

No semiárido brasileiro, o déficit hídrico constitui uma de suas principais características. Na região as chuvas são escassas, irregulares e, além disso, apresenta uma elevada demanda evaporativa, intensificada pela alta disponibilidade de energia, o que faz reduzir ainda mais a oferta hídrica.

Praticamente, a única forma de produzir alimentos em áreas de escassez hídrica é com o uso da irrigação suplementar e esta deve ser realizada de forma eficiente no que diz respeito à mão de obra, energia e água. Entretanto, o sucesso dos cultivos irrigados não resume-se apenas na adequada instalação e operação dos equipamentos, mas também na aplicação da água no momento e na quantidade que a planta necessita.

Portanto, a água aplicada pela irrigação deve ser planejada e o balanço hídrico do solo torna-se de fundamental importância, pois considera a água que entra subtraída das quantidades que saem do sistema, resultando a água que permanece no solo.

A evapotranspiração (ET) é uma das principais variáveis do balanço de água. Consiste na transferência de água do solo para a atmosfera, pela combinação da evaporação com a transpiração das plantas. Sabe-se que a ET ocorre de forma variada durante um ciclo de uma cultura, sendo influenciada por condições edafoclimáticas locais e características próprias da cultura.

A necessidade hídrica das culturas pode ser estimada conhecendo-se a demanda evapotranspirométrica do local e o coeficiente de cultura. Porém, essa medição em campo não é tão simples, pois existem dificuldades operacionais e grande variação espacial, mesmo em pequenas áreas.

Nos últimos anos houve grande avanço nas tecnologias empregadas na agricultura irrigada, porém tal progresso tem sido subaproveitado devido a fatores como, o baixo nível de conhecimento da maioria dos produtores, tecnologias de difícil operacionalização e manejos

equivocados por não levar em conta as diferentes fases da cultura. Isso sem considerar que muitos produtores se quer utilizam algum tipo de estratégia de uso e manejo da água.

São diversos os métodos empregados para a determinação da evapotranspiração da cultura, podendo ser divididos em diretos ou indiretos. Os métodos indiretos requerem dados de diferentes elementos meteorológicos e muitas vezes os modelos foram desenvolvidos em regiões diferentes de onde são aplicados, havendo a necessidade de ajustes, que quando não realizados, podem proporcionar grandes erros e gerar perdas de produção ou desperdícios consideráveis de água.

Na determinação direta, os lisímetros ou evapotranspirômetros são considerados métodos precisos e com a obtenção da ET real da cultura no nível de campo. Porém são de difícil construção e operação por parte dos pequenos irrigantes, restringindo assim, a sua utilização às instituições de pesquisas e à mão de obra especializada. São constituídos por tanques ou recipientes construídos a partir de diversos materiais e tamanhos, preenchidos com um volume de solo e devem ser instalados nas mesmas condições da cultura em estudo e área em que se deseja medir a evapotranspiração.

Diante do exposto e tendo em vista determinar a evapotranspiração de referência por um método direto, de fácil construção, utilização e baixo custo, objetivou-se com este trabalho desenvolver um lisímetro ou evapotranspirômetro simplificado e avaliar o seu desempenho no campo em relação ao método padrão Penman-Monteith - FAO.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 O Semiárido

O semiárido é uma região formada por uma área contígua, que apresenta forte insolação, e a quase totalidade da região se localiza em baixa latitude, bem próximas do Equador, entre 5 e 10° S, conferindo temperaturas predominantemente altas, balanço hídrico negativo devido às precipitações serem inferiores a 800 mm anuais e regime de chuvas marcadas pela escassez, irregularidade e concentração das precipitações num período aproximado de três meses (LOBÃO; FRANCA ROCHA; FREITAS, 2004).

As condições edafoclimáticas do semiárido são caracterizadas por solos rasos, pedregosos ou arenosos, com pouca matéria orgânica, porém ricos em minerais solúveis e pH neutro ou próximo de sete (CHIACCHIO et al., 2006). O clima é seco, com precipitações pluviométricas variando de 400 a 800 milímetros, irregularmente distribuídas e concentradas no verão. A temperatura média oscila entre 23°C e 28°C, com amplitude diária de aproximadamente 10°C, luminosidade média de 2.800 horas de luz ao ano e suas atividades agrícolas baseiam-se em cultivos de sequeiros.

No Brasil, o semiárido abrange os estados do Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Bahia e extremo norte de Minas Gerais (CODEVASF, 2016), possuindo uma área total de 980.133,079 km<sup>2</sup> onde vivem aproximadamente 23,847 milhões de pessoas distribuídas entre 1.135 municípios, o que equivale a 42,44% da população do nordeste (INSA, 2014), e é considerada a região árida mais habitada do mundo. A delimitação do semiárido no Estado da Bahia caracteriza-se por apresentar uma área de 391.485 km<sup>2</sup>, com 266 municípios, com uma população de 7.227.399 habitantes, que corresponde a 69,31% do território do Estado e 48% de sua população (INSA, 2014).

Por estas particularidades, representa um importante desafio para o manejo de solos e água em sistemas agrícolas sustentáveis, visto que possui características naturais complexas e altamente heterogêneas em relação à chuva, ao solo e a vegetação. Sabe-se que do total da água consumida no Brasil pela irrigação, mais de 20% pode ser economizada quando houver a disponibilidade de dados sobre a ET das culturas (INSTITUTO DAS ÁGUAS, 2001).

Desse modo, seria relevante a economia de água, com um impacto positivo sobre a sua utilização, que indiscutivelmente é a irrigação a atividade que mais utiliza esse recurso natural (OLIVEIRA et al., 2010).

No semiárido, por ser uma região vulnerável à seca e com características próprias, inclusive com a presença marcante da agricultura familiar, torna-se imperativo discutir não apenas os limites, mas possibilidades de seu desenvolvimento com alternativas viáveis. Melo Filho e Souza (2006), relatam que nestas condições é muito arriscado propor soluções universais ou modelos prontos, mesmo que testados em ambientes semelhantes.

## 2. 2 Conceitos e Importância da Evapotranspiração

A evapotranspiração é um tema bastante estudado e discutido. Inúmeros são os trabalhos relacionados ao consumo de água pelas plantas (MOURA et al., 2010; SILVA et al., 2015). Consiste no processo de transferência de água para a atmosfera resultante da evaporação direta da água do solo e da transpiração dos tecidos vegetais (TAGLIAFERRE et al., 2010). Ressaltam ainda que a quantificação da evapotranspiração, mesmo na agricultura de sequeiro, torna-se importante, pois possibilita estratégias de manejo da cultura em função das condições de clima local e também hídricas do solo.

A evapotranspiração além de ser importante para o planejamento em projetos de irrigação, torna-se útil também para estimar as necessidades para o uso industrial e municipal, dimensionamento de sistemas de reutilização de águas residuárias e estimativas de produção de água em bacias hidrográficas Silva (2003), afirma ainda que as informações quantitativas da evapotranspiração são importantes para as ciências que tratam do manejo da água, como planejamento, construção e operação de reservatórios. Somado a isso, estimativas precisas da evapotranspiração podem resultar em menores gastos com água e recursos financeiros, tanto no planejamento quanto no manejo de áreas irrigadas (LECINA et al., 2003).

A quantidade de água evapotranspirada depende principalmente da planta, do solo e de uma fonte de energia solar que chega à área considerada (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006). Esta energia está diretamente relacionada aos processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem na interação solo-planta-atmosfera. As suas variações alteram a temperatura e a circulação atmosférica e permitem estudos relacionados à análise de crescimento das plantas, mudanças climáticas, necessidade hídrica, dentre outros (SOUZA et al., 2013).

São dois os processos naturais no ciclo hidrológico pelos quais a água faz o caminho de volta para a atmosfera. O primeiro processo é a evaporação da água da superfície do solo e mananciais de água, e o segundo é a transpiração dos vegetais, em que a água vai para a atmosfera através dos estômatos, sob a forma de vapor.

No processo de evaporação a água é convertida em vapor obedecendo puramente as leis da física, ou seja, é dependente basicamente de parâmetros meteorológicos e como trata-se de mudança do estado físico, torna-se necessário gasto de energia. No caso, o calor latente de evaporação ( $L$ ), que corresponde a um valor médio de  $245 \text{ J mm}^{-1}$  para uma temperatura média entre  $10^\circ$  e  $30^\circ \text{ C}$ , conforme Reichardt e Timm (2004).

É importante ressaltar que o processo depende da diferença entre a pressão de vapor da água na superfície evaporante e na atmosfera, provocada pela constante movimentação das massas de ar que envolve esta superfície, o que dificulta a saturação desta camada (PEREIRA; NOVA; SEDIYAMA, 1997). Portanto o vento afeta a evaporação, acelerando com ar seco ou retardando com ar mais úmido.

A transpiração pode ser definida como a vaporização da água na fase líquida contida no vegetal e utilizada nos diferentes processos metabólicos necessários ao crescimento e desenvolvimento das plantas e sua remoção para a atmosfera. Essa vaporização ocorre no interior da folha, em espaços intercelulares e é controlada pela abertura estomática. Também depende do gradiente de pressão de vapor entre o vegetal, a atmosfera e o vento (ALLEN et al., 1998). Além disso, influenciam também o processo, fatores como a capacidade do solo de conduzir água, absorção desta pelas raízes, características da planta e seu estágio de desenvolvimento e das práticas de cultivo.

Conceitualmente, o termo evapotranspiração foi introduzido por Warren Thornthwaite & Wilm em 1944, descrevendo o processo simultâneo de evaporação e transpiração, numa superfície vegetada. Ao final da mesma década, surgiram duas importantes contribuições científicas, “An approach towards a rational classification of climate”, de Warren Thornthwaite (1948) e “Natural evaporation from open water, bare soils and grass”, de Howard Penman (1948) citados em (CARVALHO et al., 2011).

O conceito proposto por Thornthwaite consistia em explicar as variações sazonais do balanço de água no solo e tentar definir as diferenças regionais do clima (SEDIYAMA, 1998). Portanto, sua proposta era de estimar a evapotranspiração em função da temperatura média do ar a partir de um índice térmico anual e do comprimento do dia para um determinado mês do ano. Restou ao método, o entendimento da razão da evapotranspiração correspondente a uma dada temperatura não ser a mesma para diferentes locais.

Em 1948, Howard Penman, apresenta um modelo que envolve os processos físicos da evaporação. Desta forma, o novo modelo proporciona estimar a taxa da evaporação da água livre, da umidade da superfície do solo ou da vegetação, a partir dos elementos climáticos relevantes: energia radiante, temperatura, umidade e velocidade do vento (CAMARGO;

CAMARGO, 2000). Neste método, Penman combinou o balanço de energia na superfície com um termo aerodinâmico, cuja equação resultante é conhecida como equação combinada ou equação original de Penman (SEDIYAMA, 1996).

Surge, portanto, o conceito de evapotranspiração potencial, onde a transferência de água ocorre para a atmosfera em condições padronizadas.

Carvalho et al. (2011), consideram como superfície padronizada: uma área extensa de superfície natural de solo bem umedecida, totalmente coberta por vegetação baixa com desenvolvimento ativo e com dimensões suficientemente grandes, de modo a minimizar os efeitos advectivos locais. Mas, considerando que cada cultura possui suas características, tornou-se necessário definir a evapotranspiração potencial para uma cultura de referência.

Em 1960, com base no método de Penman, Monteith propôs um novo método que estimava diretamente a  $ET_c$ , denominando-o de Método de Penman-Monteith.

A Food and Agriculture Organization (FAO) estabeleceu o conceito de evapotranspiração da cultura de referência ( $ET_0$ ), em publicação mundialmente conhecida como “Guidelines for Crop Water Requirements” (Publicação FAO – 24), de autoria de (DOORENBOS; PRUITT, 1977). No Brasil, este conceito tem sido amplamente adotado e utilizado por diversos seguimentos que estudam o tema (SEDIYAMA; RIBEIRO; LEAL, 1998).

Em 1990 houve uma grande revolução sobre a proposição da conceituação e estimativa da  $ET_0$ . Neste ano a FAO promoveu, em Roma, Itália, um encontro de 14 especialistas na área, com diversos objetivos, dos quais, um era o de analisar os conceitos e procedimentos de metodologias de cálculos da ET, com enfoque no estabelecimento de uma nova definição para a cultura de referência e o método que pudesse estimar a ET para esta referência (PEREIRA; ALLEN, 1997).

Assim, o novo conceito proposto passou a ser, de fato, a  $ET_0$ , tornando-se, este, desde então, largamente utilizado, e o método recomendado para sua estimativa foi o desenvolvido por Penman-Monteith, que, após estabelecer metodologias de cálculos da  $ET_0$  e critérios que atendesse a nova definição da cultura de referência passou a denominar-se de Método de Penman-Monteith – FAO (ALLEN et al., 1998).

Para o meio agrícola é importante conhecer a quantidade de água que as culturas perdem por meio desse processo físico denominado de evapotranspiração de referência. Este processo pode ser estimado utilizando de forma padrão uma cultura hipotética que se assemelha a taxa de evapotranspiração da grama sendo, altura de 0,12 m, albedo igual a 0,23 e resistência da cultura ao transporte de vapor d’água igual a  $70 \text{ s m}^{-1}$  (ALLEN et al., 1998). Logo, a  $ET_0$  é um elemento

indicativo da demanda hídrica das culturas de um determinado local e período, representando excelentes resultados nas mais distintas condições climáticas, conforme Jensen et al. (1990) citados por (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006). Portanto, o método de Penman-Monteith – FAO representa, de maneira consistente, o fenômeno biofísico da evapotranspiração, sendo alimentado por quase todos os elementos meteorológicos observados em estações meteorológicas de superfície.

Contudo, apresenta ainda restrições quanto à qualidade e a quantidade das informações necessárias dos elementos meteorológicos como a temperatura e umidade relativa do ar, radiação solar e de velocidade do vento para que o método tenha alto desempenho na estimativa da  $ET_0$ . Deve-se ressaltar que o número de estações meteorológicas é ainda limitado para o monitoramento dessas variáveis de entradas Cunha, Magalhães e Castro (2013) ou muitas vezes não são completas, faltando algum instrumento que possibilite a medição de alguma variável, e mesmo quando se dispõe é comum ocorrerem falhas na coleta dos dados.

### 2.3 Evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ )

O termo evapotranspiração de referência, baseada na equação de Penman-Monteith e parametrizada pela FAO demonstra a íntima relação entre elementos climáticos e o fluxo de ET no sistema clima-planta, dentre outros aspectos. Entretanto são necessários outros conhecimentos relativos a estes elementos climáticos e à vários outros parâmetros caracterizadores da superfície evaporante, que permitam estimar as resistências aerodinâmicas da superfície ao fluxo de vapor d'água.

Segundo Sedyama, Ribeiro e Leal (1998) não é fácil estabelecer uma equação para a estimativa da evapotranspiração e, conseqüentemente, o cálculo direto da evapotranspiração da cultura, visto que os parâmetros de dossel da cultura variam com o próprio crescimento, com os estádios fenológicos da cultura e são influenciados pelas práticas culturais.

Para que não comprometa o desenvolvimento da planta, a água consumida pela evapotranspiração deverá ser repostada sob a forma de precipitação ou irrigação, mantendo no solo a umidade ideal para que as raízes consigam retirar a quantidade de água necessária, sem restrições (POSSE et al., 2008).

Utilizado para expressar a relação entre a  $ET_c$  e a  $ET_0$ , o valor do coeficiente da cultura ( $K_c$ ) varia de acordo com as características da cultura, datas de plantio ou semeadura,

estádio de desenvolvimento e, em menor escala, com a variação dos elementos climáticos (SEDIYAMA; RIBEIRO; LEAL, 1998).

O  $K_c$  é, portanto, uma razão adimensional usada para relacionar a evapotranspiração de uma cultura específica com a evapotranspiração de referência, num intervalo de tempo ( $K_c = ET_c / ET_0$ ).

Nesse sentido, as informações sobre a evapotranspiração e a estimativa dos coeficientes de cultura, nas diferentes fases de desenvolvimento, torna-se fundamental para projetos e manejo de irrigação, contribuindo para o aumento de produtividade e a otimização dos recursos hídricos e energéticos, que estão a cada dia mais escassos.

## 2. 4 Métodos de determinação da $ET_0$

Muitos são os métodos utilizados na determinação da evapotranspiração de referência. De acordo com Bernardo, Soares e Mantovani (2006), dentre os vários métodos diretos existentes para a determinação da  $ET_0$ , o do lisímetro é o mais preciso, desde que o equipamento seja instalado corretamente.

Entre os métodos indiretos estão os que empregam evaporímetros, como o tanque Classe A, este de utilização simples, porém com resultados muito variáveis, e as equações baseadas em dados meteorológicos, sendo em sua maioria de difícil aplicação, não só pela complexidade do cálculo, mas também por exigir grande número de elementos meteorológicos, obtidos por estações climatológicas (PIVETTA et al., 2010).

### 2. 4. 1 Método Lisimétrico

Dentre os vários métodos disponíveis, o método direto mais comumente utilizado na determinação da evapotranspiração da cultura é o método lisimétrico, que utiliza evapotranspirômetros de solo ou também denominados de lisímetros. Eles consistem de um tanque inserido no solo, preenchido com o mesmo solo do local e com vegetação, onde a evaporação ou a evapotranspiração é determinada por meio da variação no balanço de massa ou volume de água no tanque (REICHARDT; TIMM, 2004).

De acordo com Sentelhas (2001), os lisímetros são estruturas especiais em que um volume de solo vegetado é devidamente isolado, a fim de que todas as entradas e saídas de água desse sistema sejam controladas. O mesmo autor afirma que, para obter medidas precisas da evapotranspiração, a vegetação no interior do lisímetro deve apresentar as mesmas condições de altura e área foliar semelhantes da área de contorno.

Podem ser classificados em categorias como: não pesáveis, com lençol freático de nível constante; não pesáveis com drenagem livre; e pesáveis, onde a variação de massa do sistema é determinada por um mecanismo de pesagem. Além disso, são classificados, quanto ao tipo de perfil (reconstituído ou monolítico) e ao sistema de drenagem (a vácuo e por gravidade) (SILVA; FOLEGATTI; MAGGIOTTO, 1999).

Em relação aos lisímetros de pesagem, estes possibilitam determinar a evapotranspiração pelo balanço de massa em intervalos de cerca de uma hora. Dada a sua considerável precisão, são considerados equipamentos padrões para aferir outros métodos (FARIA; CAMPECHE; CHIBANA, 2006). Entretanto usualmente inacessível à agricultura de pequeno porte, muito menos a familiar (MENDONÇA et al., 2003).

#### 2. 4. 2 Tanque evaporímetro Classe A

Outra forma de se obter a evapotranspiração é por meio de tanques de evaporação. Na ausência de dados meteorológicos a evaporação do tanque Classe A é amplamente utilizada para se estimar a evapotranspiração de referência. Através de um coeficiente empírico, o coeficiente do tanque ( $K_p$ ) relaciona a evaporação do tanque com a evapotranspiração de referência (ALLEN et al., 1998). Foi desenvolvido pelo Serviço Meteorológico Norte-Americano (U.S.W.B.) e é de uso generalizado, inclusive no Brasil (PEREIRA; ALLEN, 1997).

Consiste de um recipiente circular de aço inoxidável ou de ferro galvanizado, com 1,21 m de diâmetro interno e 0,254 m de altura que deve ser instalado sobre um estrado de madeira (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006).

O método determina a evaporação de uma superfície de água livre, associada aos efeitos integrados de radiação solar, vento, temperatura e umidade do ar. Apresenta desvantagens, como a superexposição às condições ambientais, a facilidade de acesso de animais e ao fato de a evaporação ocorrer também no período noturno (SENTELHAS, 2001). Mesmo assim, é passível de utilização, em virtude do seu custo relativamente baixo. Mas a sua utilização exige observar alguns aspectos importantes, principalmente na escolha do  $K_p$  a ser utilizado. Sendo que este deverá ser ajustado às condições locais de sua aplicação (PEREIRA; ALLEN, 1997).

A lâmina de água evaporada no tanque (EV), multiplicada pelo  $K_p$ , corresponde à  $ET_0$ . Para determinação do  $K_p$ , é necessário considerar as condições meteorológicas da região e o local em que o tanque está instalado em relação ao meio circundante. De acordo com

Doorenbos e Pruitt (1977); Snyder (1992), o  $K_p$  é função de dados diários médios da velocidade do vento, da umidade relativa do ar e do tamanho da bordadura.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Caracterização da área experimental

A área em estudo pertence à microrregião de Guanambi, localizado na mesorregião Centro Sul Baiano, Nordeste Brasileiro IBGE, (2010), distante a 108 km da margem leste do Rio São Francisco e a 90 km da divisa Bahia - Minas.

O trabalho foi desenvolvido em área experimental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano – *Campus* Guanambi, distrito de Ceraíma, situado a 14° 17' de latitude Sul e 42 ° 41' de longitude Oeste de Greenwich, altitude de 546 m. O experimento foi estabelecido numa área de Latossolo Vermelho Amarelo distrófico típico, A fraco, textura média (Tabela 1), fase Caatinga hipoxerófila, relevo plano a suave ondulado (EMBRAPA, 2013).

A análise granulométrica do solo apresentada na Tabela 1, foi realizada no Laboratório de solos do IF Baiano – *Campus* Guanambi, em conformidade com o método descrito pela EMBRAPA (1997).

O clima característico da região, de acordo com a classificação de Köppen, é do tipo BSw<sub>h</sub>, clima quente de caatinga; chuvas de verão e período seco bem definido de inverno. As temperaturas médias anuais são elevadas, da ordem de 26° C; ausência de excedente hídrico e médias anuais de precipitação pluvial de 680 mm, irregularmente distribuídas, e de evapotranspiração anual de 1200 a 1400 mm (CODEVASF, 2005).

TABELA 1 – VALORES MÉDIOS DA COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA E CLASSIFICAÇÃO TEXTURAL DO SOLO NOS LISÍMETROS. GUANAMBI, BA, 2016

Camada (m)	Areia Silte Argila			Classificação textural
	(%)			
0,00 - 0,20	67	9,5	23,5	Textura média

FONTE: O autor (2016).

NOTA: % = dag Kg<sup>-1</sup>

### 3. 2 Coletas de dados meteorológicos

O trabalho foi desenvolvido com informações obtidas de uma estação meteorológica automática, da marca DAVIS (Figura 1), localizada próximo à área experimental do IF Baiano - *Campus* Guanambi, distrito de Ceraíma.

Foram obtidos os dados diários dos elementos meteorológicos temperatura máxima e mínima do ar, (°C), radiação solar ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ), umidade relativa média do ar (UR%), velocidade média do vento ( $\text{m s}^{-1}$ ) e  $\text{ET}_0$  ( $\text{mm dia}^{-1}$ ).

FIGURA 1 – ESTAÇÃO METEOROLÓGICA AUTOMÁTICA, TANQUE CLASSE A E PLUVIÔMETRO. GUANAMBI, BA, 2016



FONTE: O autor (2016).

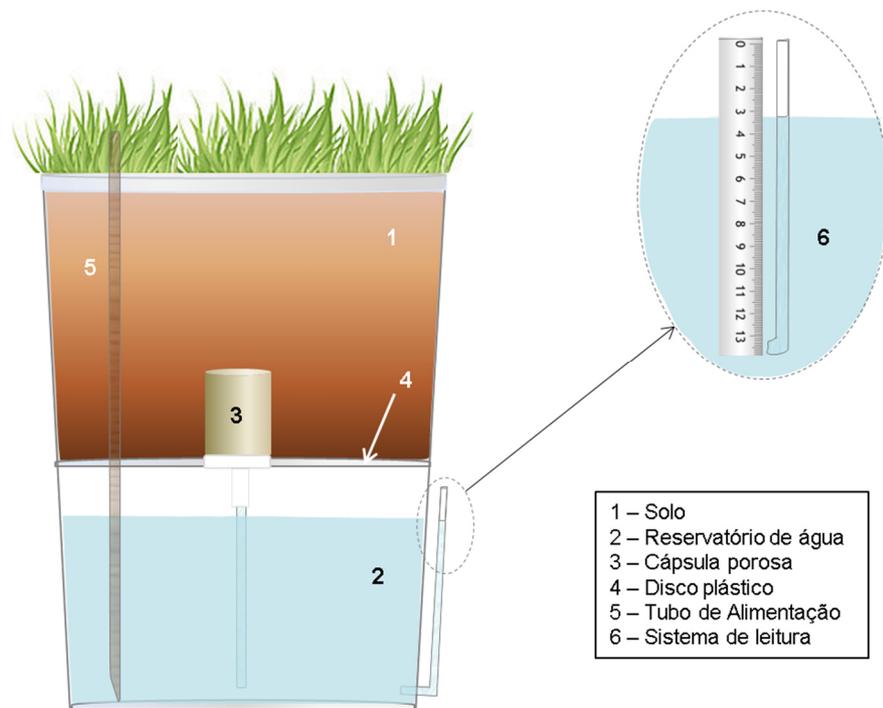
Em seguida, com auxílio de planilhas eletrônicas, os dados foram organizados e totalizados em escala de tempo de 1, 3, 5 e 7 dias, referentes a 90 dias de observações, compreendidas entre 20 de maio a 18 de agosto de 2016.

### 3.3 Descrição e funcionamento do Lisímetro Simplificado (LIS)

A ferramenta desenvolvida para o manejo da irrigação consiste de um evapotranspirômetro simplificado que tem a função de medir de forma direta a evapotranspiração de referência ou evapotranspiração da cultura de interesse (Figura 2).

O seu princípio de funcionamento baseia-se na sucção do solo não saturado, que pode ser descrita como a energia com que este retém a água quando esta encontra-se livre para se mover. É importante destacar que esta movimentação se dá a partir de um ponto de maior para outro de menor estado de energia. Esta avidéz por água é função basicamente da mineralogia, densidade e umidade do solo.

FIGURA 2 – DESENHO ILUSTRATIVO DO LISÍMETRO SIMPLIFICADO (LIS), GUANAMBI, BA, 2016



FONTE: O autor (2016).

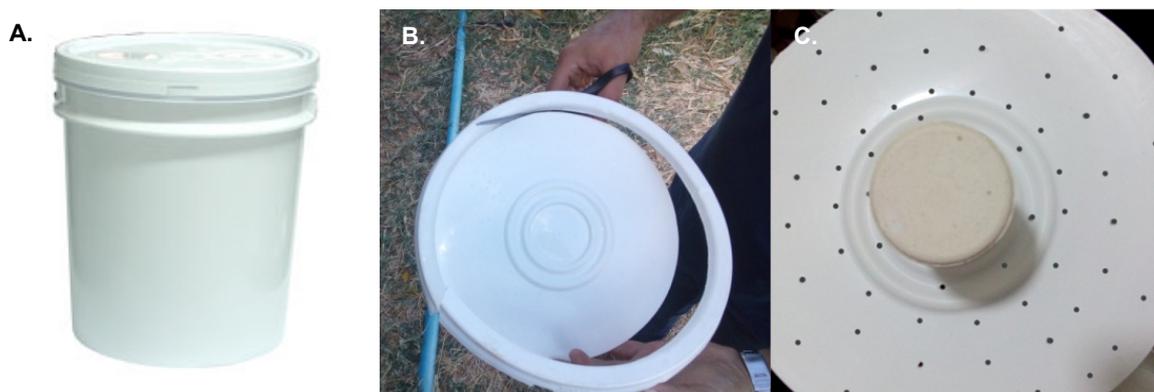
Para promover a função primordial como interface entre o solo e a água do reservatório, foi instalada uma cápsula porosa (vela de filtro de água de cerâmica), que em contato com o solo, estabelece uma continuidade hidráulica através de seus poros, havendo após algum tempo um equilíbrio de energia.

### 3. 4 Construção do Lisímetro Simplificado (LIS)

O modelo do evapotranspirômetro LIS foi desenvolvido a partir de recipientes plásticos (baldes), com volume de 20L e dimensões de 0,335 m de altura por 0,29 m de diâmetro superior (Figura 3A). A área interna do balde foi subdividida em duas partes, com o uso da própria tampa, sendo que, o compartimento inferior era reservatório para a água, com capacidade igual a 8L, e o superior era para acomodar o solo.

A tampa foi cortada na sua borda, resultando num disco com 0,272 m de diâmetro (Figura 3B), de modo a ajustar-se com o diâmetro interno do balde a uma altura de 0,135 m do fundo do balde. Em seguida, foi perfurado em vários pontos para promover a drenagem de água no solo (Figura 3C).

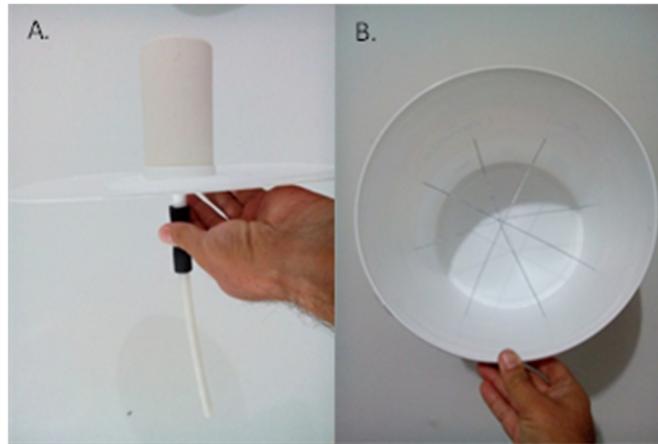
FIGURA 3 – ASPECTO DAS PARTES CONSTITUINTES DO LISÍMETRO SIMPLIFICADO (LIS), GUANAMBI, BA, 2016



FONTE: O autor (2016).

Foram utilizados fios de arame galvanizado nº18, entrelaçados de forma a sustentar o disco e, por conseguinte, a massa de solo a uma altura de 0,01m acima do nível máximo da água, formando, portanto, um espaço de 0,01m de ar entre a água e o solo. No centro do disco, foi feito um furo de 0,014 m de diâmetro para conectar a cápsula porosa a um tubo de plástico de 0,12 m de comprimento com 0,07 m de diâmetro interno (Figuras 4A e 4B).

FIGURA 4 – ASPECTO DAS PARTES INTERNAS CONSTITUINTES DO LISÍMETRO SIMPLIFICADO (LIS), GUANAMBI, BA, 2016

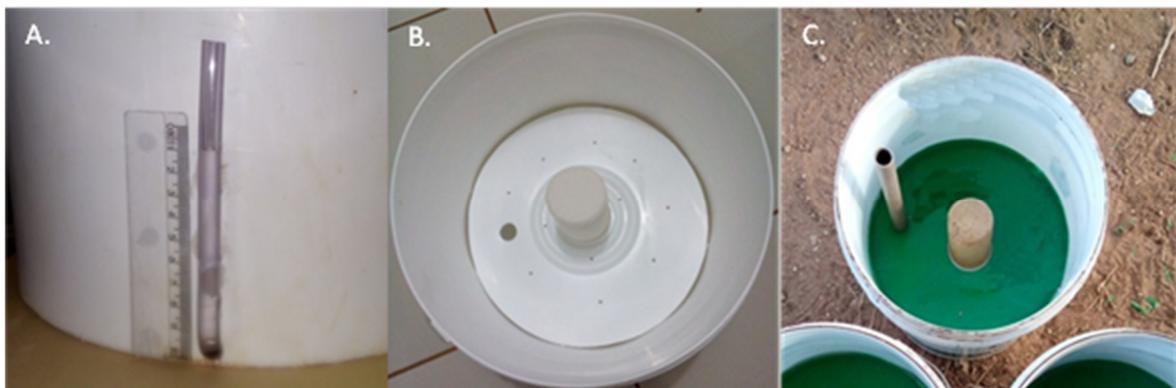


FONTE: O autor (2016).

Para o controle do volume interno de água, instalou-se um tubo transparente conectado ao reservatório inferior, de forma a monitorar o nível de água e ao mesmo tempo servir de dreno. A quantidade d'água retirada pelo processo de evapotranspiração foi determinada pela variação do nível d'água no tubo transparente. A cada leitura, a água era repostada no reservatório, utilizando-se uma proveta de 250 mL, até a marcação zero da régua milimetrada, fixada ao lado do tubo transparente (Figura 5A).

Por fim, distante 0,05 m da parede interna do balde, instalou-se um tubo em PVC de  $\frac{1}{2}$ ”, com comprimento igual a 0,36 m, cortado na sua extremidade inferior em bisel, visando evitar entupimentos, com o objetivo de reabastecimento do reservatório de água (Figuras 5B e 5C).

FIGURA 5 – ASPECTO DA INSTALAÇÃO DOS TUBOS DE CONTROLE DE ABASTECIMENTO E DO VOLUME DE ÁGUA CONSUMIDA NO LISÍMETRO SIMPLIFICADO (LIS), GUANAMBI, BA, 2016



FONTE: O autor (2016).

### 3.5 Instalação do Lisímetro no campo

Foram instalados dez lisímetros no centro da área experimental, dispostos e nivelados sobre o solo e distanciados 2 metros uns dos outros (Figura 6). Inicialmente, os lisímetros foram preenchidos com uma camada de três cm de brita nº 1, cobrindo-se esta com uma camada fina de areia grossa, completados com o solo da área experimental, na ordem inversa da sua retirada, obedecendo a sequência no perfil do solo original.

FIGURA 6 – DISPOSIÇÃO DOS LISÍMETROS NA ÁREA EXPERIMENTAL, GUANAMBI, BA, 2016



FONTE: O autor (2016).

Para cada camada de 0,1 m de solo disposta dentro do recipiente, era efetuada uma leve compactação para promover uma maior acomodação e uniformidade no enchimento dos lisímetros, sendo esta realizado com o solo seco, de modo a evitar que fosse excessiva.

A grama cultivada nos lisímetros foi da espécie Bermuda (*Cynodon dactylon* L.), folha fina. A opção por essa espécie foi feita considerando a fácil aquisição da semente e rápido estabelecimento da cultura.

Os cortes de manutenção foram realizados todas as vezes que a grama atingia 0,15 m de altura, rebaixando-a a 0,12 m, conforme preconizado por Reichardt e Timm (2004), na descrição do cultivo de referência (Figura 7).

FIGURA 7 – ASPECTO DA GRAMA BERMUDA (*Cynodon dactylon* L.) DENTRO DO LISÍMETRO, GUANAMBI, BA, 2016



FONTE: O autor (2016).

A gramínea utilizada forneceu uma cobertura uniforme e plena, além de manter-se túrgida, mesmo depois dos cortes periódicos, durante todo o experimento. Portanto, atendendo às mesmas condições da grama batatais (*Paspalum notatum* L.). Nesse sentido, tornando-se uma alternativa de uso em experimentações para as mesmas condições da região.

### 3. 6 Determinação da umidade gravimétrica no solo do Lisímetro (UG)

A umidade gravimétrica (UG) consiste num método direto de determinação do teor de água de um solo e estima a capacidade que determinado solo possui de armazenar água. É obtida através da relação entre a quantidade de massa de água do solo e a massa seca total do solo.

Para a determinação e monitoramento do teor de água do solo acomodado nos 10 lisímetros, a saída de água através tubo transparente conectado ao reservatório foi vedada e o solo foi saturado por um período de 24 horas. Logo após, a vedação do tubo foi retirada, os lisímetros foram cobertos com lona plástica para evitar a evaporação e colocados em campo para drenar livremente.

Em seguida, iniciou-se a coleta de amostras deformadas, realizadas nos tempos 0, 24, 48 e 72 horas em duas profundidades, 0 - 0,1m e 0,1 - 0,2 m e acondicionadas em recipientes de alumínio fechado.

Após a coleta, as amostras foram levadas para o laboratório de solos do IF Baiano – *Campus* Guanambi e pesadas, obtendo-se a massa do solo úmido (MSU) e colocadas na estufa a 105-110°C. Passadas 24 horas nestas condições foram transferidas para o dessecador para esfriar e, por fim, pesadas novamente, obtendo-se a massa de solo seco (MSS). A partir desses dados, pode-se calcular a umidade gravimétrica através da Equação 1:

$$UG (\%) = \frac{(MSU - MSS)}{MSS} \times 100 \quad (1)$$

onde:

UG - umidade gravimétrica (%);

MSU - peso da amostra úmida (g);

MSS - peso da amostra seca (g).

As determinações de umidade do solo nos lisímetro prosseguiram a cada 15 dias, totalizando sete amostragens durante os 90 dias da pesquisa no campo. Vale ressaltar que este monitoramento foi realizado juntamente com as primeiras leituras de  $ET_0$ , que por sua vez, somente foram iniciadas após o pleno crescimento da grama e uma melhor acomodação do solo dentro dos lisímetros.

A umidade média foi obtida a partir da umidade dos 10 lisímetros, com o objetivo de monitorar se as mesmas mantinham-se com valores próximos daquele determinado inicialmente, considerado como sendo a capacidade de campo do solo dentro dos lisímetros.

### 3. 7 Determinação da Evapotranspiração de Referência ( $ET_0$ )

A  $ET_0$ , em  $mm \text{ dia}^{-1}$ , foi obtida diariamente pelo método direto do Lisímetro Simplificado - LIS e estimada pelos métodos indiretos do tanque Classe A, que neste estudo foi utilizado apenas por ser mais difundido e de fácil aquisição e o modelo de Penman-Monteith – FAO. Este último foi considerado como padrão para comparação e análise dos métodos anteriores, conforme preconizada e parametrizada no Boletim da FAO nº 56 (ALLEN, 1998).

### 3. 7. 1 Método do Lisímetro Simplificado (LIS)

De acordo com a metodologia apresentada, a medição foi realizada diariamente, às nove horas da manhã, entre os meses de maio a agosto de 2016.

Para o cálculo da evapotranspiração de referência utilizou-se a Equação 2:

$$ET_0 = \frac{LE}{S} \quad (2)$$

onde:

$ET_0$  = evapotranspiração de referência (mm dia<sup>-1</sup>);

LE = lâmina evapotranspirada (mm<sup>3</sup>);

S = área de evaporação do Lisímetro (mm<sup>2</sup>).

Ao dividir o volume evapotranspirado (em mm<sup>3</sup>) pela área de evaporação do lisímetro (66051,93 mm<sup>2</sup>), tem-se a lâmina evapotranspirada, em mm. Finalmente, a  $ET_0$  média foi obtida da média das lâminas evapotranspiradas dos 10 lisímetros instalados no campo.

### 3. 7. 2 Método Penman-Monteith – FAO (PM)

Tendo em vista sua comprovada precisão, independentemente da escala temporal e espacial e a disponibilidade de dados das principais variáveis meteorológicas, o método PM foi adotado como padrão, portanto como o mais adequado para as estimativas da evapotranspiração de referência porque se baseia em princípios físicos e considera todos os fatores climáticos que afetam a evapotranspiração de referência, conforme propuseram (ALLEN et al., 1998), (Equação 3).

A evapotranspiração de referência foi obtida diretamente da estação, que realiza os cálculos utilizando o método PM como padrão, Os dados de  $ET_0$  obtidos em escala horária foram contabilizados para períodos de 1, 3, 5 e 7 dias.

$$ET_0 = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \times \left( \frac{900}{T+273} \right) \times U_2 \times (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \times (1 + 0,34 \times U_2)} \quad (3)$$

onde:

$ET_0$  - evapotranspiração de referência (mm dia<sup>-1</sup>);

$\Delta$  - declividade da curva de pressão de vapor em relação à temperatura ( $\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$ );

$R_n$  - saldo de radiação diário ( $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ );

$G$  - fluxo total diário de calor no solo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ );

$\gamma$  - coeficiente psicrométrico ( $\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$ );

$U_2$  - velocidade do vento registrada a 2m de altura ( $\text{m s}^{-1}$ );

$e_s$  - pressão de saturação de vapor ( $\text{kPa}$ );

$e_a$  - pressão real ou atual de vapor d'água ( $\text{kPa}$ );

$(e_s - e_a)$  - déficit de pressão de saturação de vapor de água ( $\text{kPa}$ );

$T$  - temperatura média do ar ( $^\circ\text{C}$ ).

A declividade da curva de pressão de vapor ( $\Delta$ ), é calculado através da Equação 4:

$$\Delta = \frac{(4098 \times e_s)}{(237,3 + T)^2} \quad (4)$$

onde:

$e_s$  - pressão de saturação de vapor ( $\text{kPa}$ );

$T$  - temperatura média do ar ( $^\circ\text{C}$ ).

O coeficiente psicrométrico ( $\gamma$ ), é calculado empregando-se a Equação 5:

$$\gamma = 0,665 \times 10^{-3} P_{atm} \quad (5)$$

onde:

$P_{atm}$  - pressão atmosférica local ( $\text{kPa}$ ).

A  $P_{atm}$ , por sua vez, pode ser calculada com base na altitude do local ( $Z$ ), através da Equação 6:

$$P_{atm} = 101,3 \left( \frac{293 - 0,0065 Z}{293} \right)^{5,23} \quad (6)$$

Os valores de  $e_s$  e  $e_a$  são calculados através das Equações 7 e 8:

$$e_s = 0,6108 \times 10^{\left( \frac{7,5 \times T}{237,3 + T} \right)} \quad (7)$$

$$e_a = \frac{(UR_{med} \times e_s)}{100} \quad (8)$$

onde:

$UR_{med}$  - umidade relativa média do ar (%), fornecida pela estação meteorológica;

### 3. 7. 3 Método do tanque Classe A

Para as determinações da  $ET_0$  com o tanque Classe A, o mesmo foi instalado a 0,15 m do solo, sobre um estrado de madeira, em área com solo nu. A leitura do nível da água foi feita num poço tranquilizador de 0,25 m de altura e 0,1 m de diâmetro, com um parafuso micrométrico de gancho, com capacidade para medir variações de 0,01 mm.

Na operação de reabastecimento completava-se com a água até a marca de 0,08 m no parafuso micrométrico e dentro do limite de 0,05 a 0,07 m abaixo da borda (Figura 1).

Para a conversão da evaporação em evapotranspiração de referência, utilizou-se a Equação 9:

$$ET_0(TQ) = ECA \times Kp \quad (9)$$

onde:

ECA – lâmina da evaporação do tanque Classe A ( $\text{mm dia}^{-1}$ );

$Kp$  – coeficiente de tanque ou ajuste (decimal).

Para o cálculo do  $Kp$ , foi utilizado a equação de SNYDER (1992):

$$Kp = 0,482 + 0,024 \ln(F) - 0,000376 U + 0,0045 UR \quad (10)$$

onde:

F – distancia (tamanho) da área de bordadura, em (m);

U – velocidade do vento, ( $\text{m s}^{-1}$ ), e

UR – umidade relativa, média do dia, (%);

### 3. 8 Metodologia adotada para avaliação do desempenho do Lisímetro Simplificado (LIS)

A análise foi realizada com dados de 1, 3, 5 e 7 dias da  $ET_0$ , em  $\text{mm dia}^{-1}$ , durante um período de 90 dias de observações, utilizando-se da análise de regressão, considerando o

modelo linear  $y = bx + a$ , na qual a variável dependente foi o método de Penman-Monteith – FAO, e a variável independente os valores de  $ET_0$  medidos pelo LIS e pelo método do tanque Classe A. Foram analisados os ajustes dos modelos de regressão por meio do teste “t” de student, a 5% de probabilidade.

A metodologia adotada para a comparação dos resultados foi a proposta por Allen et al. (1986) e adotada por Jensen, Burman e Allen (1990), a qual se fundamenta no erro padrão da estimativa (EPE), calculada pela Equação 11, onde o método Penman-Monteith – FAO é considerado como padrão.

$$EPE = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (y - x)^2}{n - 1} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

onde:

EPE - erro padrão da estimativa, ( $\text{mm d}^{-1}$ );

y - evapotranspiração de referência estimado pelo método padrão, ( $\text{mm d}^{-1}$ );

x - evapotranspiração de referência medido pelo LIS, ( $\text{mm d}^{-1}$ ), e

n - número total de observações.

O coeficiente de correlação de Pearson foi calculado usando-se a Equação 12:

$$r = \frac{[\sum_{i=1}^n (x - \bar{x}) \cdot (y - \bar{y})]^2}{\sum_{i=1}^n (x - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y - \bar{y})^2} \quad (12)$$

onde:

x - evapotranspiração de referência medido pelo método LIS ( $\text{mm d}^{-1}$ );

y - evapotranspiração de referência estimado pelo método padrão ( $\text{mm d}^{-1}$ );

$\bar{y}$  - média dos valores obtidos pelo método padrão ( $\text{mm d}^{-1}$ ), e

n – número total de observações.

A aproximação dos valores de  $ET_0$  obtidos através do método estudado, em relação aos valores obtidos com o uso do método padrão, foi calculado pelo índice designado concordância ou ajuste, representado pela letra “d” (WILLMOTT; CKLESON; DAVIS, 1985). A faixa de valores do índice d varia de zero, para uma completa dispersão entre os valores, e 1, para uma perfeita concordância, calculada pela Equação 13:

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x - y)^2}{\sum_{i=1}^n [(|x - \bar{y}|) + (|y - \bar{y}|)]^2} \quad (13)$$

onde:

d - índice de concordância ou ajuste;

x - evapotranspiração de referência medido pelo método LIS (mm d<sup>-1</sup>);

y - evapotranspiração de referência estimado pelo método padrão (mm d<sup>-1</sup>);

$\bar{y}$  - média dos valores obtidos pelo método padrão (mm d<sup>-1</sup>)

n - número total de observações.

Para obter o desempenho dos modelos avaliados, utilizou-se o índice “c” proposto por Camargo e Sentelhas (1997) que é o produto dos coeficientes de correlação “r” e de concordância “d” calculada pela Equação 14:

$$c = r \times d \quad (14)$$

A avaliação do desempenho dos métodos observados foi dada de acordo com a classificação da Tabela 2.

TABELA 2 – CLASSIFICAÇÃO DO ÍNDICE DE CONFIANÇA OU DESEMPENHO “C”

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

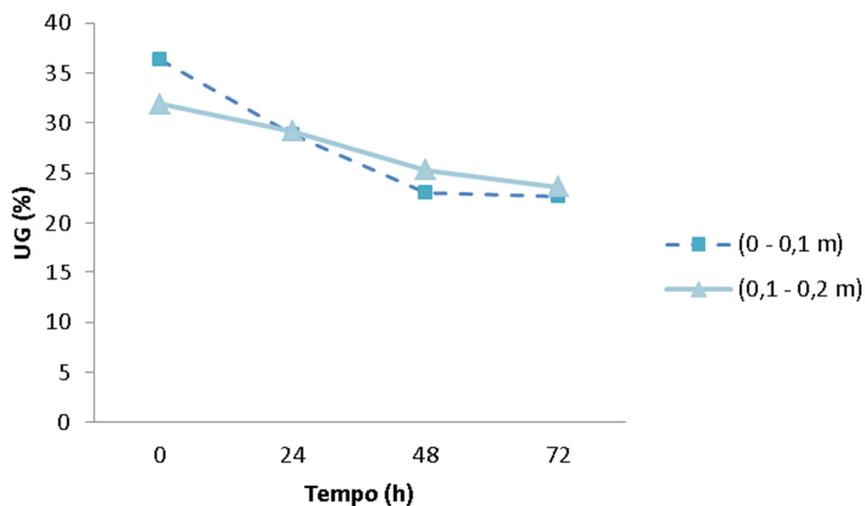
FONTE: Camargo e Sentelhas (1997).

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Quanto a umidade gravimétrica média (UG) nos lisímetros, observa-se um decréscimo nos valores no decorrer do tempo analisado, e com isso pode-se inferir que o disco que separa o reservatório de água do solo, funcionou, visto que promoveu a drenagem livre da água (Figura 8).

A umidade na camada de 0 – 0,1 m, tida como importante para as culturas de pequeno porte apresentou um maior percentual inicial de umidade gravimétrica em função do tempo, quando comparada com a camada de 0,1 – 0,2 m. Contudo, houve um decréscimo acentuado nos dois primeiros dias, partindo de 36,3 a 23,0 %, e a partir do terceiro dia a umidade atingiu 22,6%.

FIGURA 8 – CURVA DA UMIDADE GRAVIMÉTRICA (UG) MÉDIA EM FUNÇÃO DO TEMPO NAS PROFUNDIDADES DE (0 – 0,1 m) E (0,1 – 0,2 m), PARA AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE CAMPO NOS LISÍMETROS, GUANAMBI, BA, 2016



FONTE: O Autor (2016).

Essa dinâmica da água, pode ser explicado pela força que a gravidade exerce, forçando a água para baixo através do peso. A água contida no solo entra em equilíbrio com as forças de capilaridade dos poros, fazendo com que cesse a percolação de água armazenada no solo (SANTOS et al.; 2013).

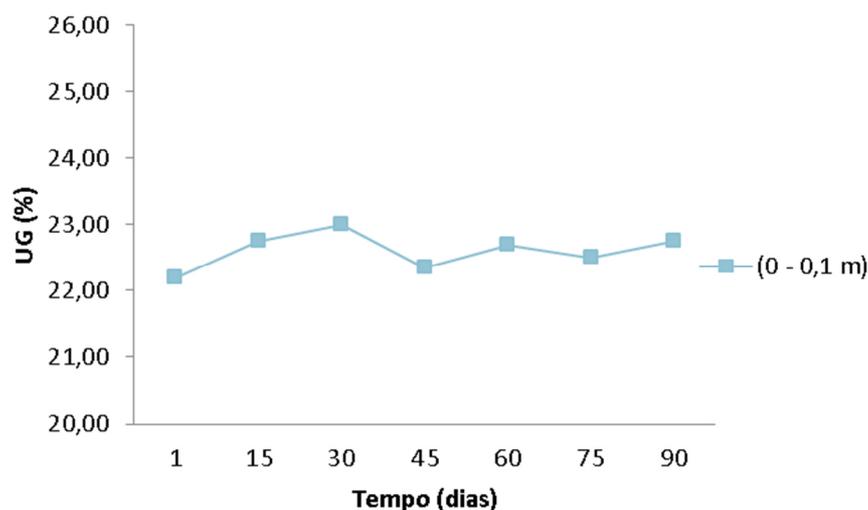
Diferentemente, o solo de (0,1 – 0,2 m) teve sua umidade reduzida mais lentamente, com valor igual 23,60 % ao final das 72h, 4,24 % maior que a camada mais superficial.

Provavelmente, essa tendência se deve ao fato da cápsula porosa estar contida nesta camada, mantendo-a mais úmida.

Nota-se que para as condições estudadas foi necessário um período mínimo de três dias, que é o período favorável para que ocorra a total retenção de água através dos poros existentes no solo. Assim, o sistema inicia a sua estabilização juntamente com o processo de sucção da água pelo solo, que é o princípio básico de funcionamento do lisímetro desenvolvido.

De acordo com o monitoramento dos valores médios da umidade gravimétrica (UG) realizado, a umidade dentro dos lisímetros manteve-se por todo período da avaliação entre 22,2 e 23,0 %, com um coeficiente de variação igual a 1,2 %, indicando baixa variação da umidade de água no solo (Figura 9).

FIGURA 9 – VALORES MÉDIOS DA UMIDADE GRAVIMÉTRICA (UG) EM FUNÇÃO DO TEMPO NA PROFUNDIDADE DE (0 – 0,1 m) NOS LISÍMETROS, GUANAMBI, BA, 2016

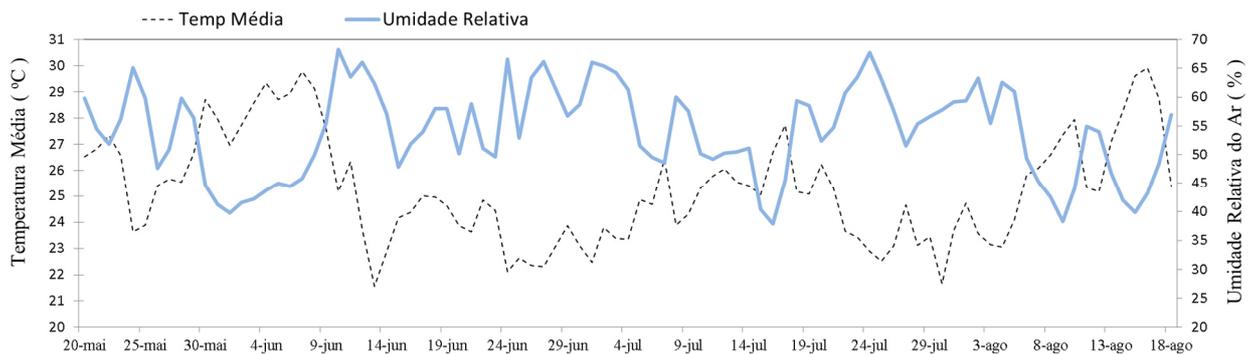


FONTE: O Autor (2016).

A evapotranspiração (ET) é obtida da combinação de muitos elementos meteorológicos que se interagem simultaneamente. As variações médias diárias dos elementos meteorológicos, temperatura do ar, umidade relativa do ar, radiação solar e velocidade do vento, foram obtidas na estação meteorológica automática e são apresentadas nas Figuras 10 e 11. Segundo Lemos Filho et al., (2010) e Junges et al., (2012) estes parâmetros são os que apresentam maior efeito sobre a ET, além de serem essenciais para o uso do método Penman-Monteith – FAO.

A temperatura média do ar no período do experimento foi igual a 25,3°C; a média da temperatura máxima foi igual a 30,6°C; e a média da temperatura mínima 20,6°C, registradas pela estação, sendo a normal climatológica para a região igual a 26,5°C.

FIGURA 10 – VARIACÕES MÉDIAS DIÁRIAS DA TEMPERATURA MÉDIA E DA UMIDADE RELATIVA DO AR, PARA O PERÍODO DE 20 DE MAIO A 18 DE AGOSTO DE 2016, REGISTRADAS PELA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA AUTOMÁTICA, GUANAMBI, BA, 2016



FONTE: O Autor (2016).

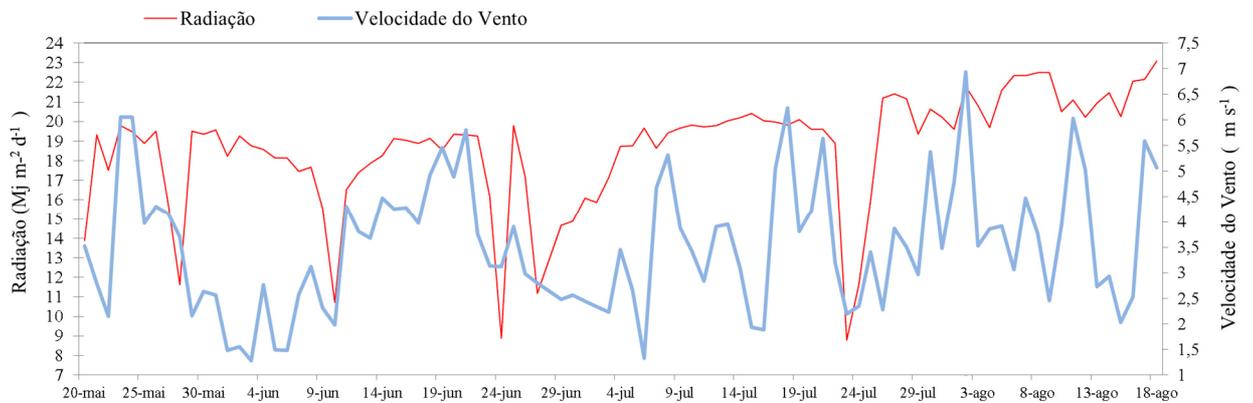
Observa-se, pela análise da Figura 10, a grande variação da temperatura do ar e da umidade relativa (UR), com registros de valores médios entre 21,6 a 29,9°C e 37,8 a 68,3%, respectivamente. Na mesma análise, nota-se que à medida que a temperatura aumenta, a UR decresce, demonstrando que a umidade relativa tem uma tendência de evolução inversa à da temperatura do ar, desde que este não esteja saturado de vapor d'água.

Essa tendência oposta pode revelar que, em locais com registros de menores valores de UR, correspondem normalmente aqueles onde ocorreram as maiores taxas de  $ET_0$ , devido às baixas concentrações de vapor d'água. Esta ocorrência se deve ao fato de que a umidade relativa de um local determina o déficit de pressão de vapor, que é considerado um indicador da capacidade evaporativa do ar (FIETZ; FISCH, 2009).

Deve-se salientar que houve registro da temperatura máxima igual a 36,4°C e da mínima igual a 15,8°C e também de ocorrências de chuvas no local, representando um acumulado de 3,4 mm em todo período.

Quanto à velocidade do vento, a 2 m de altura da superfície do solo, esta oscilou entre valores de 1,75 a 6,98  $m s^{-1}$ , apresentando uma amplitude igual a 5,23  $m s^{-1}$ , e um valor médio igual a 3,8  $m s^{-1}$ , sendo a ocorrência da maior média registrada no mês de agosto igual a 4,12  $m s^{-1}$  (Figura 11).

FIGURA 11 – VARIACÕES MÉDIAS DIÁRIAS DA RADIAÇÃO E DA VELOCIDADE DO VENTO, PARA O PERÍODO DE 20 DE MAIO A 18 DE AGOSTO DE 2016, REGISTRADAS PELA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA AUTOMÁTICA, GUANAMBI, BA, 2016



FONTE: O Autor (2016).

Este elemento meteorológico tem importante participação na energia utilizada para a vaporização e remoção de água a partir de superfícies evaporantes (REICHARDT; TIMM, 2004).

Foram registrados ventos com velocidade de até  $6,9 \text{ m s}^{-1}$ , considerada moderada, de acordo com (DOORENBOS; PRUITT, 1977). As maiores velocidades foram registradas entre os meses de julho e agosto, época de ventos de maior intensidade na região do estudo.

A radiação solar é uma das variáveis meteorológicas mais importantes para a estimativa da evapotranspiração. Os valores da radiação diminuíram em curtos períodos de tempo, em média de 3 a 4 dias, com registros que variaram entre  $8,79$  e  $23,08 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , tendo seus valores mínimos ocorridos em 24/06 e 23/07, (Figura 11). Esse comportamento influenciou os valores de temperatura e de umidade relativa do ar e, conseqüentemente ocasionando aumento na taxa de evapotranspiração. Portanto, quanto maior a disponibilidade de energia solar, maior a temperatura do ar e a velocidade do vento e, quanto menor a umidade relativa do ar, maior deverá ser a demanda evaporativa da atmosfera, quando a umidade do solo não for fator restritivo (TAGLIAFERRE et al., 2015).

#### 4. 1 Desempenho do método do Lisímetro Simplificado (LIS)

Os resultados das comparações entre os valores de  $ET_0$  obtidos pelo método do LIS e do tanque Classe A (TCA) com os valores estimados pelos métodos Penman-Monteith - FAO (PM), e seus respectivos coeficientes das equações de regressão a e b, coeficiente de determinação ( $r^2$ ), erro padrão da estimativa (EPE), coeficiente de correlação (r), índice de

concordância (d), índice de confiança ou desempenho (c), e valores da  $ET_0$  ( $\text{mm d}^{-1}$ ) diárias, três, cinco e sete dias, encontram-se na Tabela 3.

Verifica-se que o EPE, que são os erros proporcionados pelas estimativas, medidas pelo método LIS, foi igual a  $0,52 \text{ mm d}^{-1}$ , superestimando a  $ET_0$  média em  $0,30 \text{ mm d}^{-1}$ , o que corresponde a um aumento de 4,5% sobre o valor estimado pelo método padrão, Tabela 2.

TABELA 3 – PARÂMETROS DE DESEMPENHO E ANÁLISE DE REGRESSÃO DA  $ET_0$  MÉDIA CALCULADA PELO MÉTODO PENMAM-MONTEITH – FAO (PM) EM RELAÇÃO AO MÉTODO DO LISÍMETRO SIMPLIFICADO (LIS) E TANQUE CLASSE A (TCA), EM PERÍODOS DE 1, 3, 5 E 7 DIAS, GUANAMBI, BA, 2016

Métodos	Diária							Classificação*	$ET_0$ ( $\text{mm d}^{-1}$ )
	a	b	$r^2$	EPE	r	d	c		
PM	-	-	-	-	-	-	-	-	5,73
LIS	1,079	0,767	0,71	0,52	0,84	0,89	0,75	Bom	6,03
TCA	4,746	0,171	0,06	1,47	0,25	0,52	0,13	Mau	5,75
Três dias									
PM	-	-	-	-	-	-	-	-	5,73
LIS	1,143	0,756	0,74	0,42	0,86	0,89	0,76	Muito Bom	6,03
TCA	3,265	0,428	0,27	0,71	0,52	0,75	0,39	Mau	5,75
Cinco dias									
PM	-	-	-	-	-	-	-	-	5,73
LIS	1,330	0,725	0,74	0,38	0,86	0,87	0,76	Muito Bom	6,03
TCA	2,999	0,474	0,38	0,59	0,61	0,77	0,47	Mau	5,75
Sete dias									
PM	-	-	-	-	-	-	-	-	5,73
LIS	0,845	0,805	0,82	0,32	0,91	0,88	0,76	Muito Bom	6,03
TCA	1,859	0,669	0,80	0,33	0,90	0,92	0,83	Muito Bom	5,75

\* Camargo e Sentelhas (1997). FONTE: O autor (2016)

Muito embora a grama da área experimental fosse mantida com altura igual a da borda dos lisímetros, provavelmente o comportamento de superestimar os valores  $ET_0$  em relação ao modelo, pode ser atribuído à superexposição das paredes dos lisímetros à radiação solar e aos efeitos do calor advectivo proveniente de áreas secas adjacentes, já que os mesmos foram instalados sobre o solo.

Também vale destacar que essa cobertura vegetal sofreu com o longo período seco, mesmo que as irrigações fossem constantes para manter o gramado fechado e uniforme.

O processo de evapotranspiração tem influência direta da temperatura do ar. Isso se dá por conta de a radiação solar absorvida pela atmosfera e o calor emitido pela superfície cultivada fazer elevar a temperatura do ar (MOUCO, 2010). Ressalta ainda que o ar aquecido próximo às plantas transfere energia para a cultura na forma de fluxo de calor sensível, aumentando as taxas evapotranspirométricas.

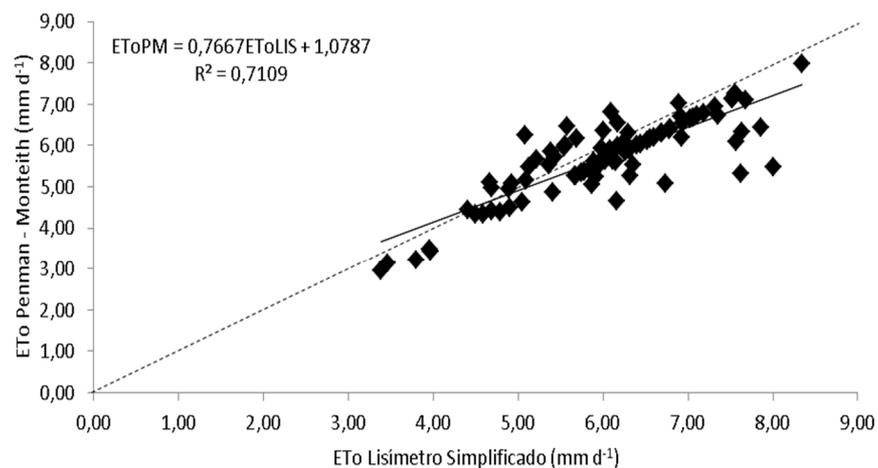
Pereira et al. (2001), estudando problemas operacionais com lisímetros de pesagem durante a estação chuvosa e em dias secos com rajadas de vento, chamam atenção para a necessidade de ser rigoroso com as condições de contorno que visam diminuir os efeitos advectivos, principalmente em épocas de maior deficiência hídrica.

De fato as dificuldades em se manter as condições internas e externas dos lisímetros com as mesmas características são evidentes (Sedyama, 1996), pois normalmente, as plantas tendem a crescer mais no interior do mesmo ou além dos limites de sua borda (efeito buquê).

De acordo com a Figura 12, observa-se que a maior parte dos pares de ponto encontra-se abaixo da linha de valores 1:1 onde o método LIS superestima os valores de  $ET_0$  diária em relação à Penman-Monteith - FAO ( $ET_{0PM}$ ). Nota-se ainda, que há uma pequena dispersão ao redor da linha de regressão, porém próximos e acompanhando a linha de valores, o que reforça uma boa estimativa da  $ET_{0PM}$  por meio de  $ET_{0LIS}$ .

A comparação com o método padrão propiciou valores de coeficiente de correlação e concordância de 0,84 e 0,89, respectivamente, o que refletiu em um bom ajuste do modelo de regressão, com desempenho “c” igual a 0,75, conforme critérios de (CAMARGO; SENTELHAS, 1997).

FIGURA 12 – REGRESSÃO LINEAR ENTRE VALORES MÉDIOS DIÁRIOS DA VAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA ( $ET_0$ ), EM  $MM\ DIA^{-1}$ , OBTIDO SEGUNDO O MÉTODO DE PENMAN-MONTEITH (PM), EM RELAÇÃO AO MÉTODO DO LISÍMETRO SIMPLIFICADO (LIS), PARA O PERÍODO DIÁRIO, GUANAMBI, BA, 2016



Fonte: o autor (2016).

Os valores médios de  $ET_0$  apresentaram melhoria do coeficiente de determinação ( $r^2$ ) em relação aos os valores de  $ET_0$  medidos pelo equipamento desenvolvido a medida que se

aumentou o intervalo para 3, 5, e 7 dias de avaliação. Estes valores foram respectivamente iguais a 0,74; 0,74 e 0,82, enquanto o índice de confiança “c” foi aproximadamente igual a 0,76, sendo classificado como muito bom (Tabela 3).

Conforme a Tabela 2, a evapotranspiração de referência estimada pelo TCA apresentou resultados diários insatisfatórios, com EPE igual a 1,47 mm d<sup>-1</sup> e r<sup>2</sup> igual a 0,06, conseqüentemente com baixo índice de confiança, o que demonstra nenhuma relação com o método LIS e o método padrão. Vescove e Turco (2005), ao compararem o TCA com o de PM na região de Araraquara - SP, também não obtiveram boa correlação, evidenciando baixo ajuste.

O manejo do TCA foi realizado conforme a metodologia citada por (REICHARDT; TIMM, 2004). Contudo, a cada semana, quando completava-se o tanque com água até 0,05 m da borda, um incremento no valor diário da ET<sub>0</sub> era observado em relação à medida dos dias posteriores. Provavelmente, com o nível da água próximo da borda do tanque, a ação dos frequentes ventos do local provocou maiores evaporações.

Nas condições do norte de Minas Gerais, Figueiredo et al. (2002) compararam valores de ET<sub>0</sub> obtidos pelo método de Penman-Monteith com o TCA e, dentre os elementos meteorológicos avaliados, a velocidade do vento foi o que mais influenciou na determinação da evapotranspiração de referência. Os autores concluíram ainda que nos meses de maio a julho, o TCA superestimou a ET<sub>0</sub>.

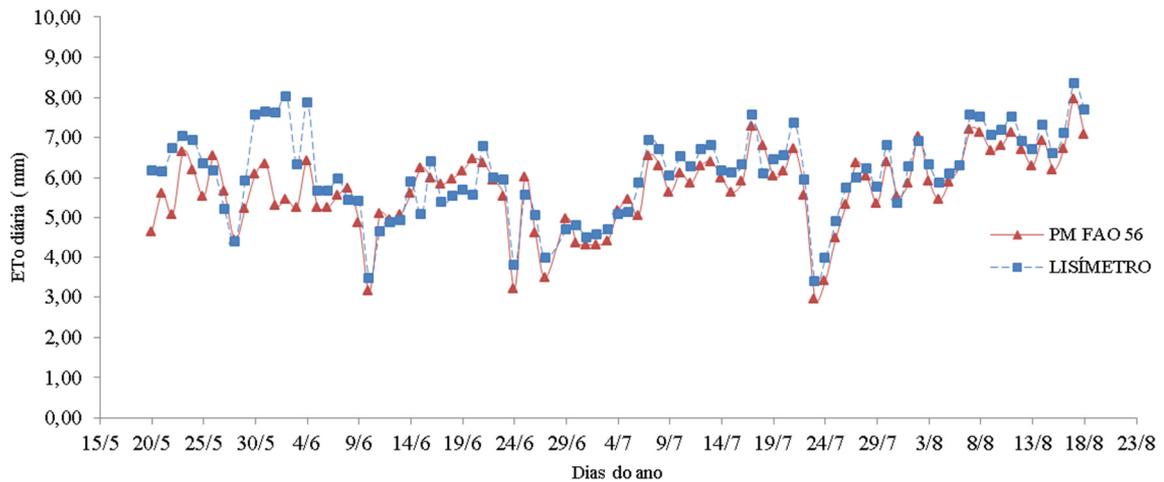
Nos intervalos de três e cinco dias, os valores de ET<sub>0</sub> estimados pelo TCA seguiram apresentando os coeficientes de desempenho muito baixos, com r<sup>2</sup> iguais a 0,27 e 0,38 e EPE iguais a 0,71 e 0,59 mm d<sup>-1</sup>, respectivamente. Já o intervalo de sete dias, o método apresentou melhoria dos coeficientes, sendo o de determinação igual a 0,80 e o de ajuste igual 0,92, próximo da unidade; e redução da EPE para 0,33 mm d<sup>-1</sup>, em relação ao seu comportamento apresentado na estimativa diária (Tabela 2).

Cavalcante Júnior et al. (2011) testaram 15 diferentes métodos de estimativas de ET<sub>0</sub> nas condições do semiárido nordestino, em condições de umidade relativa, baixa (<70%) e elevada (>70%), concluíram que o método do TCA obteve o menor valor de correlação para as duas condições de umidade, e o maior erro padrão da estimativa no período seco.

De maneira geral, o TCA é recomendado para períodos de tempo superiores a 10 dias, mas ainda assim, necessitando de um estudo mais aprofundado para encontrar o valor adequado do coeficiente do tanque (Kp) para as condições locais (SEDIYAMA, 1996).

Na Figura 13 observa-se o gráfico com o comportamento da tendência e da magnitude da  $ET_0$ , durante o período de estudo, em uma escala diária, entre o método do LIS e o método de Penman-Monteith – FAO.

FIGURA 13 – EVOLUÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERENCIA ( $ET_0$ ), ENTRE O MÉTODO DO LISÍMETRO SIMPLIFICADO (LIS) E O MÉTODO DE PENMAN-MONTEITH (PM), PARA O PERÍODO DE 20 DE MAIO A 18 DE AGOSTO DE 2016, GUANAMBI, BA, 2016



Fonte: o autor (2016)

Observa-se que há uma tendência da curva do método LIS seguir a curva de  $ET_0$  de PM, durante a maior parte do período estudado. Isso significa que, de uma forma geral, a  $ET_0$  estimada pelo método proposto aumenta e diminui em valor simultaneamente, acompanhando a  $ET_0$  estimada por PM, com exceção do período entre 27 de maio e 8 de junho, coincidindo com o aumento da radiação e da temperatura média do ar e redução da umidade relativa, sendo estes valores iguais a  $20,0 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ,  $29,8^\circ \text{ C}$  e  $24\%$ , respectivamente (Figuras 10 e 11), sugerindo que estes elementos meteorológicos foram determinantes para a ocorrência de lâminas evapotranspirativas elevadas.

Pretende-se que o Lisímetro Simplificado (LIS) seja um método utilizado por produtores para obter de forma simples e confiável, medidas de evapotranspiração, e assim o manejo da irrigação seja efetuado de maneira satisfatória. Uma adequação será feita no LIS para permitir que o mesmo possa ser enterrado, com o nível da cultura dentro do lisímetro no mesmo nível do solo externo, o que, provavelmente, irá minimizar a superestimação da  $ET_0$ . Para tanto, uma nova forma de leitura das lâminas evapotranspiradas tem que ser adotada em futuros estudos para validação da ferramenta.

## 5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados encontrados no presente trabalho, pode-se concluir que:

O Lisímetro Simplificado - LIS, desenvolvido com materiais de fácil acesso e de baixo custo e de fácil construção, teve um desempenho satisfatório, apresentando boas condições de funcionamento e permitindo a obtenção de medidas de evapotranspiração em concordância com as estimativas realizadas pelo método de Penman-Monteith – FAO;

A estimativa diária dos valores da  $ET_0$  pelo LIS foi sensível às variáveis climáticas consideradas e apresentou tendência similar ao longo do período de avaliação com a  $ET_0$  do método de Penman-Monteith – FAO, com superestimação de  $0,30 \text{ mm dia}^{-1}$ ;

O LIS possibilitou estimativas diárias dos valores de evapotranspiração durante todo período de observações, sem interrupções nas leituras, demonstrando viabilidade da metodologia;

O LIS proporcionou estimativas de  $ET_0$  mais concordantes com Penman-Monteith – FAO que o tanque Classe A, que é um método de maior custo de implantação e maior complexidade de operação quando comparado com o lisímetro desenvolvido.

Considerando que a metodologia desenvolvida e os resultados apresentados neste estudo para a obtenção da evapotranspiração ainda são incipientes, mas bastante promissores, novos estudos devem ser realizados visando melhorias, portanto, para uma segura validação do método.

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUA (ANA). **Levantamento da agricultura irrigada por pivôs centrais no Brasil - 2014**: relatório síntese. Brasília: ANA, 2016. 33 p. ISBN 9788582100349. Disponível em: < <http://arquivos.ana.gov.br/imprensa/arquivos/ProjetoPivos.pdf>>. Acesso em: 01 out. 2016.
- ALLEN, R.G. A Penman for all seasons. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**. New York, v. 112, n. 4, p. 348-386, 1986.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMUTH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop requirements**. Roma: FAO, 1998. 301p. Irrigation and drainage paper 56.
- BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8. ed. – Viçosa: Ed. UFV, 2006. 625p.
- 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.
- CARVALHO, L. G.; RIOS, G. F. A.; MIRANDA, W. L. e NETO, P. C. (2011). Evapotranspiração de referência: uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. *Pesquisa Agropecuária Tropical (Agricultural Research in the Tropics)*, 41(3), 10-5216.
- CAVALCANTE JÚNIOR, E.G.; OLIVEIRA, A.D.; ALMEIDA, B.M.; ESPÍNOLA SOBRINHO, J. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para condições do Semiárido Nordeste. *Seminário: Ciências Agrícolas, Londrina*, v.32, supl. 1, p.1699-1708, 2011.
- CHIACCHIO, F.P.B.; MESQUITA, A.S.; SANTOS J.R. Palma forrageira: uma oportunidade econômica ainda desperdiçada para o semi-árido baiano. *Bahia Agrícola*, v.7, n.3, p.39-49, 2006. Disponível em:<[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_nlinks&pid=S1983-2125201500030024800007&lng=en](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_nlinks&pid=S1983-2125201500030024800007&lng=en)> Acesso em: 28 nov. 2016.
- CODEVASF – Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba, 2005. Diagnóstico ambiental dos perímetros irrigados da Codevasf – 2ª Superintendência Regional. Brasília: CODEVASF, 2005. 222p.
- CUNHA, F. F.; MAGALHÃES, F.F.; CASTRO, M.A. Métodos para estimativa da evapotranspiração de referência para chapadão do Sul – MS. **Engenharia na Agricultura**. v. 21(2): 159 – 172. 2013.
- DESCHEEMAER, K.; MAPEDZA, E.; AMEDE, T.; AYALNEH, W. Effects of integrated watershed management on livestock water productivity in water scarce areas in Ethiopia. *Physics and Chemistry of the Earth*, Oxford, v. 35, n. 13-14, p. 723-729, 2010.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O.. **Guidelines for predicting crop water requirements**. FAO – (Irrigation and Drainage Paper 24), 2nd ed., Rome, 1977.p.179.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3º ed., Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 2013. 412p.

FARIA, R.T. de; CAMPECHE, F. de S. M.; CHIBANA, E.Y.. Construção e calibração de lisímetros de alta precisão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 1, p. 237-242, Mar. 2006. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1415-43662006000100035&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662006000100035&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em: 15 nov.2016.

FIETZ, C. R.; FISCH, G. F. Avaliação de modelos de estimativa do saldo de radiação e do método de Priestley-Taylor para a região de Dourados, MS. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, n.4, p.449-453, 2009.

FIGUEIREDO, F.P.; SOARES, A.A.; COSTA, L.C.; RAMOS, M.M.; OLIVEIRA, F.G. Análise comparativa das estimativas da evapotranspiração de referência, pelos métodos de Penman-Monteith e tanque classe “A”, nas condições edafoclimáticas do norte de Minas Gerais. UNIMONTES CIENTÍFICA, Montes Claros, v.4, n.2, jul./dez.2002.

JENSEN, M.E.; BURMAN, R.D.; ALLEN, R.G. **Evapotranspiration and irrigation water requirements**. ASCE Manual. And Reports on Engineering Practice No. 70. New York:, ASCE, 1990, 332 p.

JUNGES, T. S. C.; DALLACORT, R.; INOUE, M. H.; MODOLO, A. J.; RAMOS, H. C. Estimativa da evapotranspiração de referência por diferentes métodos para a região de Sinop - MT. **Enciclopédia Biosfera**, v. 8, n. 14, p. 516-529, 2012.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Censo 2010. 2010. Disponível em:< [http://www. Censo 2010. ibge. gov. br/](http://www.Censo2010.ibge.gov.br/)>. Acesso em: 23 mar. 2017.

INSTITUTO DAS ÁGUAS DO PARANÁ. Disponível em: <http://www.aguasparana.pr.gov.br/modules/conteudo.php?conteudo=49>. Acesso em: 06 Abr. 2016.

INSTITUTO NACIONAL DO SEMIÁRIDO - INSA. Website. 2014. Disponível em: <http://www.insa.gov.br>. Acesso em: 05 Abr. 2016.

LECINA, S.; MARTINES-COB, A.; PEREZ, P.J.; VILLALOBOS, F.J.; BASELGA, J.J. Fixed versus variable bulk canopy resistance for reference evapotranspiration estimation using the Penman–Monteith equation under semiarid conditions. **Agricultural Water Management**. n.60. p.181-198. 2003.

LEMOS FILHO, L.C.A.; CARVALHO, L.G.; EVANGELISTA, A.W.P.; ALVES JUNIOR, J. Análise espacial da influência dos elementos meteorológicos sobre a evapotranspiração de referência em Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**,

Campina Grande, v.14, n.12, p.1294-1303, Dec. 2010. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1415-43662010001200007&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662010001200007&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em: 15 mai. 2017.

LOBÃO, J. S. B.; FRANCA ROCHA, W.J.S.; FREITAS, N.B. Semiárido da Bahia, limites físicos ou sócio-político? Uma abordagem geocológica para a delimitação oficial. In: Simpósio Regional de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto. 2. 2004, Aracaju/ SE. Anais eletrônicos... Sergipe, 2004. Disponível em: <<http://www.cpatc.embrapa.br/labgeo/srgsr2/pdfs/poster15.pdf>> Acesso em: 19 dez. 2016.

MELO FILHO, J. F.; SOUZA, A. L. V. O manejo e a conservação do solo do semi-árido baiano: desafios para sustentabilidade. **Revista Bahia Agrícola**, v. 07, n. 03, p. 50-60, 2006.

MENDONÇA, J.C.; SOUSA, E.F.; BERNARDO, S.; DIAS, G.P.; GRIPPA, S. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) na região Norte Fluminense, RJ. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina grande, v.7, n.2, p.275-9, 2003.

MOUCO, M A. do C. **Cultivo da Mangueira**. Embrapa Semiárido Sistemas de Produção, 2, 2º ed. ISSN 1807-0027. Versão Eletrônica. agosto/2010. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/884451/1/CultivodaMangueira.pdf>>. Acesso em: 15 nov. 2016.

MOURA, C. R. W.; ZOLNIER, S.; RIBEIRO, A.; OLIVEIRA, R. A. Avaliação de métodos de estimativa da evapotranspiração horária para alface cultivada em sistema hidropônico em ambiente protegido. **Engenharia Agrícola**, v.30, p.646-656, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162010000400009>> Acesso: 11 nov.2016.

OLIVEIRA, G. M.; LEITÃO, M.V.B.R; BISPO, R. C.; SANTOS, M.S.; ALMEIDA, A.C. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência na região norte da Bahia. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada** v.4, n.2, 2010.

PEREIRA, A.R.; SANTIAGO, A.V.; MAGGIOTO, S.R.; FOLEGATTI, M.V. 2001. Problemas operacionais com lisímetros de pesagem durante a estação chuvosa e em dias secos com rajadas de vento. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, 10(1): 51-6.

PEREIRA, L.S.; ALLEN, R.G. Novas aproximações aos coeficientes culturais. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.16, n.4, p.118-43, 1997.

PEREIRA, A.R.; NOVA, N.A.V.; SEDIYAMA, G.C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183 p.

PIVETTA, C. R.; HELDWEIN, A. B.; MALDANER, I. C.; RADONS, S. R.; TAZZO, I. F.; LUCAS, D. D. Evapotranspiração máxima do pimentão cultivado em estufa plástica em função de variáveis fenométricas e meteorológicas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, p.768-775, 2010.

POSSE, R.P.; BERNARDO, S.; SOUSA, E.F. de; GOTTARDO, R.D. Evapotranspiração e coeficiente da cultura do mamoeiro. **Engenharia Agrícola**, vol.28, n.4, p.681-690,

2008. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162008000400008>> Acesso: 02 dez. 2016.

REICHARDT, K.; TIMM, L.C. **Solo, Planta e Atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. São Paulo: Editora Manole, 478p, 2004.

SANTOS, C. S.; SILVA, P. F.; SANTOS, J. C. C.; SILVA, C. H.; BARROS, A. C. Estimativa da umidade na capacidade de campo em vasos e em laboratório. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**. Mossoró – RN, v.8, n.2, p. 151-160, 2013.

SEDIYAMA, G. C. Evapotranspiração: Necessidades de água para as plantas cultivadas. Brasília, DF: ABEAS, 1998, 181 p. (Curso de especialização à distância).

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

SEDIYAMA, C. G.; RIBEIRO, A.; LEAL, B. G. Relações clima-agua-planta. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27, 1998. Poços de Caldas. **Anais...** Poços de Caldas: UFLA/SBEA, 1998. p. 46-85.

SENTELHAS, P.C. Agrometeorologia aplicada à irrigação. In: MIRANDA, J.H. & PIRES, R.C.M. **Irrigação – Série Engenharia Agrícola**. Piracicaba, SP: FUNEP, 2001. 410 p.

SILVA, V.P.R.; GARCÊZ, S.L.A.; SILVA, B.B.; ALBUQUERQUE, M.F.; ALMEIDA, R.S.R. Métodos de estimativa da evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar em condições de sequeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.19, n.5, p. 411-417, May 2015. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1415-43662015000500411&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662015000500411&lng=en&nrm=iso)>. Acesso: 05 Fev. 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n5p411-417>.

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**. Piracicaba, SP, 2003. 93p. Tese (Doutorado) – Escola Superior “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

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

SNYDER, R. L. Equation for evaporation pan to evapotranspiration conversion. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 118, n. 6, p. 977-980, 1992.

SOUZA, A. P.; MOTA, L. L.; ZAMADEI, T.; MARTIM, C. C.; ALMEIDA, F. T.; PAULINO, J. Classificação climática e balanço hídrico climatológico no estado de Mato Grosso. *Nativa*, Sinop, v. 01, n. 01, p.34-43, out./dez., 2013.

TAGLIAFERRE, C.; SILVA, R.A.J.; ROCHA, F.A.; SANTOS, L.C.; SILVA, C. S. Estudo Comparativo de diferentes metodologias para determinação da evapotranspiração de referência em Eunápolis- BA. **Revista Caatinga**, Mossoró, v.23, n.1, p.103-111, 2010.

TAGLIAFERRE, C.; de PAULA, A.; ROCHA, F. A.; CAMPOS, W. V.; GUIMARÃES, D. U. G. Influência dos elementos meteorológicos na evapotranspiração de referência estimada utilizando-se o Irrigâmetro no município de Guanambi-BA-DOI: 10.13083/1414-3984/reveng. v. 23, n.3, p; 251-260. **ENGENHARIA NA AGRICULTURA/Engineering in Agriculture**, 23(3), 251-260, 2015.

VESCOVE, H. V.; TURCO, J. P. Comparação de três métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região de Araraquara-SP. *Engenharia Agrícola, Jaboticabal*, v. 25, nº 3, p. 713 – 721, 2005.

WILLMOTT, C.J.; CKLESON, S. G.; DAVIS, R. E. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, v. 90, n. C5, p. 8995-9005, 1985.