

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

**MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CULTURA DA  
CANA-DE-AÇÚCAR EM CONDIÇÕES DE SEQUEIRO**

**SILVIA LETÍCIA ALVES GARCÊZ**

Campina Grande - PB

Março de 2013

SILVIA LETÍCIA ALVES GARCÊZ

**MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CULTURA DA  
CANA-DE-AÇÚCAR EM CONDIÇÕES DE SEQUEIRO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Mestre em Meteorologia.

Orientadores: Prof. Dr. Vicente de Paulo Rodrigues da Silva  
Prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva

Campina Grande – PB  
Março de 2013

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

- G215m      Garcêz, Silvia Leticia Alves.  
             Métodos de estimativa da evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar em condições de sequeiro / Silvia Leticia Alves Garcêz. – Campina Grande, 2013.  
             63 f. : il. color.
- Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.
- "Orientação: Prof. Dr. Vicente de Paulo Rodrigues da Silva, Prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva".  
             Referências.
1. Balanço de Energia.    2. Razão de Bowen.    3. Balanço Hídrico do Solo.    4. Priestley-Taylor.    I. Silva, Vicente de Paulo Rodrigues da. II. Silva, Bernardo Barbosa da.    III. Título.

CDU 551.5:528.8(043)

SILVIA LETÍCIA ALVES GARCÊZ

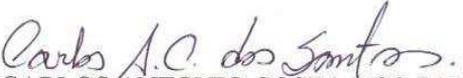
MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CULTURA DA  
CANA-DE-AÇÚCAR EM CONDIÇÕES DE SEQUEIRO

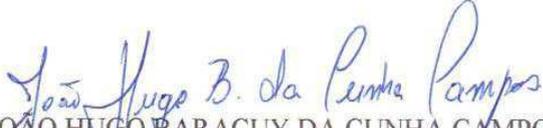
DISSERTAÇÃO APROVADA EM 25/03/2013

BANCA EXAMINADORA

  
Prof. Dr. VICENTE DE PAULO RODRIGUES DA SILVA  
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Campina Grande

  
Prof. Dr. BERNARDO BARBOSA DA SILVA  
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Campina Grande

  
Prof. Dr. CARLOS ANTONIO COSTA DOS SANTOS  
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Campina Grande

  
Prof. Dr. JOÃO HUGO BARACUY DA CUNHA CAMPOS  
Departamento de Engenharia Civil  
Universidade Estadual da Paraíba

**Dedico** esta conquista à minha maravilhosa família: meus pais Letícia e Jurandi Garcêz, meu esposo Leonardo Watanabe, minha avó Leopoldina Lima e minhas irmãs Ana Cristina e Cinthia Garcêz

## **AGRADECIMENTO**

Agradeço primeiramente a Deus que sempre fez o certo para a minha vida. Agradeço, pela vida e por me acompanhar durante ela, especialmente nos momentos mais difíceis. Agradeço ainda por Ele ter me presenteada com a melhor família que eu poderia ter e por Ele ter colocado pessoas maravilhosas, que assim como minha família, foram também fundamentais em minha vida pessoal e acadêmica.

A minha base e meu exemplo de vida, meus pais Jurandi e Letícia Garcêz. Agradeço pela dedicação em me educar e formar. Por terem investido nos meus estudos e por tudo que fizeram para que eu chegasse até aqui. Vocês são tudo para mim.

A minha querida e amada avó Leopoldina Lima, que sempre apoiou as minhas escolhas. Agradeço principalmente por sempre acreditar em mim e em tudo que fiz e faço. Agradeço pelo colo e afago quando precisava e por acreditar em meus sonhos. Te amo muito.

Ao meu esposo, Leonardo Watanabe, pelo apoio, companheirismo, amizade, e incentivo. Obrigada por seu amor e carinho, por estar sempre presente e tornar minha vida mais tranquila. Divido com você essa minha vitória.

As minhas irmãs e grandes amigas, Ana e Cinthia Garcêz, pelo amor e carinho, por suas constantes e incondicionais presenças em todos os momentos da minha vida. Sou muito grata por ter vocês em minha vida.

Ao meu orientador, prof. Dr. Vicente de Paulo Rodrigues da Silva, por me aceitar como orientada. Pelo apoio, incentivo e confiança em mim depositada. Agradeço por todo o conhecimento, dedicação e atenção na elaboração da minha dissertação.

Ao meu co-orientador, prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva, por sua contribuição na elaboração da minha dissertação e por seu conhecimento científico.

A Universidade Federal de Campina Grande e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e, em especial, ao Programa de Pós Graduação em Meteorologia, agradeço pela oportunidade de aprendizado e crescimento e pela bolsa de mestrado a mim concedida.

Agradeço aos professores do Programa de Pós Graduação em Meteorologia pelos ensinamentos e colaboração com a nossa formação profissional.

A nossa querida secretária Divanete C. Rocha pela atenção, dedicação e disposição com que sempre nos tratou durante todo o período do mestrado.

Agradeço a todos os meus amigos e colegas que conquistei durante esse período, em especial, a Ana Paula Santos, Sergio Santos, Camilla Borges, Alexandra Tavares, Ana Raquel e Rayonil Carneiro. Vocês fizeram parte da minha vida e foram minha família quando estava longe de casa. Fizeram a diferença na hora dos estudos, nas alegrias e também nas dificuldades. A vocês, meu muito obrigada.

Por fim, agradeço a todos aqueles que, embora não citados diretamente, contribuíram de alguma forma para transformar o meu título de mestre em realidade

A todos, o meu muito obrigada!

*“O melhor indicador do caráter de uma pessoa  
é como ela trata as pessoas que não podem lhe  
trazer benefício algum”*

*Abigail Van Buren*

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE TABELAS</b>	xi
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	xii
<b>LISTA DE SÍGLAS</b>	xiii
<b>LISTA DE ABREVIACÕES E SÍMBOLOS</b>	xiv
<b>RESUMO</b>	xvii
<b>ABSTRACT</b>	xviii
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	19
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	22
<b>2.1.</b> Necessidades hídricas da cana-de-açúcar.....	22
<b>2.2.</b> Aspectos climáticos para o cultivo da cana-de-açúcar .....	23
<b>2.3.</b> Consumo hídrico da cana-de-açúcar .....	26
<b>2.4.</b> Balanço hídrico do solo .....	27
<b>2.5.</b> Balanço de energia com base na razão de Bowen .....	31
<b>2.6.</b> Método de Priestley-Taylor .....	33
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	34
<b>3.1.</b> Descrição da área de estudo .....	34
<b>3.2.</b> Tratos culturais e dados experimentais .....	35
<b>3.3.</b> Evapotranspiração de referência .....	35
<b>3.4.</b> Evapotranspiração da cultura .....	35
<b>3.4.1.</b> Método do balanço de energia .....	36
<b>3.4.1.1.</b> Medições ambientais para o balanço de energia .....	38
<b>3.4.2.</b> Método de Priestley-Taylor .....	39
<b>3.4.2.1.</b> Medições ambientais para Priestley-Taylor .....	39
<b>3.4.3.</b> Método do coeficiente de cultivo .....	40
<b>3.4.4.</b> Método do balanço hídrico no solo .....	40
<b>3.4.4.1.</b> Medições ambientais para o balanço hídrico no solo .....	41
<b>3.5.</b> Análise estatística.....	42

<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>43</b>
<b>5. CONCLUSÕES .....</b>	<b>52</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>53</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b>	Faixa de variação do coeficiente da cultura ( $K_c$ ) da cana de açúcar em função dos estádios de desenvolvimento da cultura.....	40
<b>Tabela 2.</b>	Evapotranspiração mensal da cana-de-açúcar (mm/mês) pelos métodos do balanço de energia ( $ET_{BE}$ ), Priestley & Taylor ( $ET_{PT}$ ), método do coeficiente de cultivo ( $ET_{Kc}$ ) e pelo método do balanço hídrico no solo ( $ET_{BH}$ ).....	43
<b>Tabela 3.</b>	Coeficiente de cultivo calculado pelos métodos do balanço de energia ( $K_{cBE}$ ), Priestley & Taylor ( $K_{cPT}$ ) e pelo método do balanço hídrico no solo ( $K_{cBH}$ ).....	44
<b>Tabela 4.</b>	Estimativa do coeficiente de Priestley-Taylor pelos métodos do balanço de energia ( $\alpha_{BE}$ ), coeficiente de cultivo ( $\alpha_{Kc}$ ) e balanço hídrico do solo( $\alpha_{BH}$ ).....	51
<b>Tabela 5.</b>	Análise estatística dos valores da evapotranspiração pelos métodos do balanço de energia ( $ET_{BE}$ ), Priestley-Taylor ( $ET_{PT}$ ) e coeficiente de cultivo ( $ET_{Kc}$ ) em relação ao método do balanço hídrico do solo.....	51

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b>	Localização da área de estudo no município de Capim, Paraíba.....	34
<b>Figura 2.</b>	Comportamento temporal dos valores diários de ETo estimados pelos métodos de Penman-Monteith FAO (ETo), balanço de energia ET (BE), Priestley-Taylor ET (PT), coeficiente de cultura ET (Kc) e do balanço hídrico ET (BH) em Capim, PB.....	45
<b>Figura 3.</b>	Comparação entre a evapotranspiração da cana-de-açúcar pelos métodos do balanço de energia (ET <sub>BE</sub> ) e balanço hídrico no solo (ET <sub>BH</sub> ).....	46
<b>Figura 4.</b>	Comparação entre a evapotranspiração da cana-de-açúcar pelos métodos de Priestley-Taylor (ET <sub>PT</sub> ) e balanço hídrico no solo (ET <sub>BH</sub> ).....	46
<b>Figura 5.</b>	Comparação entre a evapotranspiração da cana-de-açúcar pelos métodos do coeficiente de cultivo (ET <sub>Kc</sub> ) e balanço hídrico no solo (ET <sub>BH</sub> ).....	47
<b>Figura 6.</b>	Comportamento temporal do coeficiente de Priestley & Taylor pelos métodos do balanço de energia [ $\alpha$ (BE)-A], coeficiente de cultivo [ $\alpha$ (Kc)-B] e balanço hídrico no solo [ $\alpha$ (BH)-C].....	48
<b>Figura 7.</b>	Comparação entre a evapotranspiração da cana-de-açúcar pelos métodos do balanço de energia ET(BE) e de Priestley-Taylor com coeficiente determinado com base no balanço de energia ET(P-T) <sub>BE</sub> .....	49
<b>Figura 8.</b>	Comparação entre a evapotranspiração da cana-de-açúcar pelos métodos do coeficiente de cultivo ET(Kc) e o de Priestley-Taylor com o coeficiente determinado com base no coeficiente de cultivo ET(P-T) <sub>Kc</sub> ...	49
<b>Figura 9.</b>	Comparação entre a evapotranspiração da cana-de-açúcar pelos métodos do balanço hídrico ET(BH) e de Priestley-Taylor com o coeficiente determinado com base no balanço hídrico ET(P-T) <sub>BH</sub> .....	50

**LISTA DE SÍGLAS**

CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EMD	Erro médio dos desvios
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FAO	Food and Agriculture Organization
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICMS	Imposto sobre circulação de mercadorias e prestação de serviços
IDEME	Instituto de Desenvolvimento Municipal e Estadual
IPI	Imposto sobre produtos industrializados
PCD	Plataforma de Coleta de Dados
PIA	Produto Interno Agrícola
RQMDN	Raiz quadrada do quadrado médio do erro normalizado
SINDALCOOL	Sindicato da Indústria do Alcool e do Açúcar da Paraíba
UNICA	União da indústria de cana-de-açúcar
USDA	United States Department of Agriculture

**LISTA DE ABREVIACOES E SÍMBOLOS**

$\bar{\theta}$	Umidade do solo média até a profundidade considerada
$\Delta W$	Variacão da lâmina/armazenamento de água disponível no solo
R	Escoamento superficial
A	Ascensão capilar
BE	Balanço de energia
BH	Balanço hídrico
$C_p$	Calor específico do ar a pressão constante
D	Drenagem profunda
$\Delta T$	Diferença de temperatura do ar
$\Delta e_a$	Pressão de vapor d'água na camada de ar acima da copa das plantas
$\Delta$	Declinao da curva de saturao do vapor da água
$\gamma$	Fator psicrométrico
E	Taxa de evaporao
$e_a$	Pressão real do vapor
E	Taxa de evaporao em equilíbrio
$e_s$	Pressão de saturao do vapor de água
$e_s(t_u)$	Pressão de saturao do vapor d'água  temperatura do bulbo mido
ET <sub>c</sub>	Evapotranspirao da cultura
ET <sub>est</sub>	Evapotranspirao da cana-de-açúcar estimada como base nos métodos do balanço de energia e pelo método de Priestley-Taylor
ET <sub>obs</sub>	Evapotranspirao obtida com base no método do balanço hídrico no solo
ET <sub>o</sub>	Evapotranspirao de Referência
ETP	Evapotranspirao Potencial

ETR	Evapotranspiração Real
F	Energia utilizada no processo fotossintético
G	Fluxo de calor no solo
H	Fluxo de calor sensível
I	Lâmina de irrigação
Kc	Coeficientes de cultura
Kh	Coeficientes de transferência nos processos de difusão turbulenta de calor sensível
Kw	Coeficientes de transferência nos processos de difusão turbulenta de calor latente
L	Calor latente de vaporização
LE	Fluxo de calor latente
LE <sub>B</sub>	Fluxo de calor latente obtido pela razão de Bowen
LE <sub>PT</sub>	Fluxo de calor latente obtido método de Priestley-Taylor
n	Número de dados da série temporal
P	Precipitação pluviométrica
$\bar{P}$	Pressão atmosférica média
R <sup>2</sup>	Coeficiente de determinação
$\Delta W_t$ e $\Delta W_{t-1}$	Representam os armazenamentos de água no perfil do solo nos instantes t e t-1
Rn	Saldo de Radiação
s	Inclinação da curva da pressão do vapor de saturação “versus” temperatura
S <sub>d</sub>	Energia armazenada no sistema solo-dossel vegetativo
T e T <sub>a</sub>	Temperatura do ar

$t_u$	Temperatura do bulbo molhado
$U_2$	Velocidade do vento (média diária) a 2 m acima da superfície do solo
$W$	Armazenamento e água no solo
$\alpha$	Coefficiente de Priestley-Taylor
$\beta$	Razão de Bowen

## MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR EM CONDIÇÕES DE SEQUEIRO

### RESUMO

O principal objetivo deste trabalho foi encontrar um método eficiente na determinação da evapotranspiração da cana-de-açúcar com pouca exigência de medições ambientais. Os experimentos de campo foram realizados na Fazenda Capim II (UNIAGRO), localizado no município de Capim – PB, no período de outubro 2009 a agosto de 2010. Os dados para determinação da evapotranspiração foram obtidos na parcela de sequeiro e os dados para a determinação da evapotranspiração de referência foram obtidos na PCD (Plataforma de Coleta de Dados) do INPE. Os resultados da pesquisa permitem concluir que o método de Priestley-Taylor apresentou valores muito próximos daqueles da evapotranspiração de referência em todo o ciclo da cultura. Além disso, o método de Priestley-Taylor com o coeficiente ajustado foi o que apresentou o melhor desempenho na estimativa da evapotranspiração da cana-de-açúcar quando comparado com as medições obtidas pelo método do balanço hídrico do solo. Os resultados também indicam que o coeficiente de Priestley-Taylor pelo método do balanço de energia é o mais apropriado para determinação da evapotranspiração da cultura de cana-de-açúcar nas condições de cultivo dos tabuleiros costeiros do Estado da Paraíba. Além disto, o coeficiente  $\alpha$  de Priestley-Taylor varia consideravelmente em função do estágio fenológico da cultura. Os valores de  $\alpha$  para a cultura da cana-de-açúcar foram significativamente maiores do que aqueles adotados por Priestley-Taylor, com valores médio de 1,5; 1,6 e 1,5, respectivamente, pelos métodos do balanço de energia, coeficiente de cultivo e do balanço hídrico do solo.

**Palavra chave:** Balanço de energia, razão de Bowen, balanço hídrico do solo, Priestley-Taylor.

## METHODS FOR ESTIMATING THE EVAPOTRANSPIRATION CULTURE OF SUGAR CANE IN TERMS OF UPLAND

### ABSTRACT

The main objective of this study was to find an efficient method in determining the evapotranspiration of cane sugar with little requirement for environmental measurements. Field experiments were conducted in Grass Farm II (UNIAGRO), located in the city of Grass - PB, from October 2009 to August 2010. The data for determining evapotranspiration were obtained in upland portion of the data and to determine the reference evapotranspiration were obtained in PCD (Data Collection Platform) INPE. The survey results allow us to conclude that the method of Priestley-Taylor showed values very close to those of the reference evapotranspiration throughout the crop cycle. Moreover, the method of Priestley-Taylor with the adjusted coefficient showed the best performance in the evapotranspiration of cane sugar when compared with measurements obtained by the method of soil water balance. The results also indicate that the coefficient of Priestley-Taylor method of energy balance is most appropriate for determination of crop evapotranspiration of sugar cane cultivation in the conditions of the coastal plains of the state of Paraíba. Moreover, the coefficient  $\alpha$  Priestley-Taylor varies considerably depending on the growth stage of the crop. The values of  $\alpha$  for the cultivation of cane sugar were significantly higher than those adopted by Priestley-Taylor, with median values of 1.5, 1.6 and 1.5, respectively, by the methods of energy balance, crop coefficient and soil water balance.

**Keywords:** Energy balance, Bowen ratio, soil water balance, Priestley-Taylor.

## 1. INTRODUÇÃO

O setor sucroalcooleiro é de grande relevância no contexto sócio-econômico do país, visto que a cultura da cana-de-açúcar é uma das mais importantes espécies agrícolas exploradas no Brasil. O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar no mundo, segundo a UNICA (União da Indústria de Cana-de-açúcar) com produção de aproximadamente 560 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, sendo também o maior produtor e exportador de açúcar, segundo a USDA (United States Department of Agriculture), e o segundo maior produtor de etanol do mundo, segundo a F.O Licht. De acordo com o Procana (Centro de informações sucroenergéticas), o setor sucroalcooleiro foi responsável por aproximadamente 2% do PIB nacional e por 8% do PIB da agricultura no Brasil em 2011, tendo empregado cerca de 4,5 milhões de pessoas. Ainda segundo a UNICA, no Brasil se planta cana-de-açúcar no Centro-Sul e no Norte-Nordeste, o que permite dois períodos de safra. Em São Paulo, maior produtor de cana do país, a colheita com máquinas já é realizada em mais de 65% dos canaviais do Estado. Ressalta-se ainda que o Brasil é responsável por aproximadamente 20% da produção e 40% das exportações. A produção de açúcar foi de 35,925 mil toneladas e a produção de Etanol total foi de 22,682 mil m<sup>3</sup>.

Segundo a EPE (Empresa de Pesquisa Energético), na safra de 2011/12, assim como nas anteriores, houve aumento da área de cana colhida e redução da produtividade. De acordo com o relatório da CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento) de abril de 2012, a área colhida foi de 8,4 milhões de hectares, um aumento de 3,9% com relação à 2010/2011. A produtividade da cana caiu 11,8%, atingindo 68,3 tc/ha. O volume de cana moída em 2011 foi de 565,8 milhões de toneladas, com redução de 9,8% em relação a 2010, quando a produção alcançou 627,3 milhões de toneladas. A taxa média de crescimento de moagem de cana de 2000 a 2011 foi de aproximadamente 7,5% a.a., afetada pelo baixo crescimento de 2010 e queda de 2011. Para efeito de comparação, registra-se que a taxa de crescimento de 2000 a 2009 foi de 10,4%. Já a produção de etanol, em 2011, foram produzidos 23 milhões de litros de etanol, sendo 8,7 bilhões de anidro e o restante de hidratado. Esse volume representa uma queda de 17,8% sobre 2010, quando foram produzidos 28 bilhões de litros, dos quais 8 bilhões de anidro e 19,9 bilhões de hidratado. Os principais derivados da cana-de-açúcar são o açúcar (alimento) e o álcool (hidratado e anidro), imprescindíveis ao mercado mundial; outros produtos, também originados dessa cultura e que devem ser salientados, são a aguardente, o bagaço (fonte de energia) e a vinhaça (fertilizante) (Souza et al., 1999).

As regiões tradicionalmente canavieiras, como as regiões dos Tabuleiros Costeiros e Zona da Mata do Nordeste do Brasil, não dispõem mais de área para expansão, tornando-se imprescindível o manejo adequado dessa cultura visando o aumento de sua produtividade. Isso implica em conhecer os padrões de crescimento de cada variedade da cultura, fazendo com que as fases de máximo desenvolvimento coincidam com os períodos de maior disponibilidade hídrica e radiação solar, permitindo que ela expresse todo seu potencial genético (Keating et al., 1999; Stone et al., 1999).

A cana-de-açúcar é o produto agropecuário mais importante do Estado da Paraíba, apesar da sua baixa produtividade, provocada pelas precipitações irregulares na região produtora e pelo uso ineficiente dos fertilizantes (Silva et al., 2009). Segundo o IDEME (Instituto de Desenvolvimento Municipal e Estadual da Paraíba), mais de 25% da safra de cana-de-açúcar deixaram de ser moída, devido ao fato de a estiagem, que normalmente afeta o Agreste e o Sertão nordestinos, desta vez se estendeu um pouco mais e atingiu também a Zona da Mata paraibana, onde estão os canaviais. Com a seca, o ciclo de vida da cana começou a ser afetado, ou seja, uma planta que vive cinco safras em média, com a escassez da chuva, está morrendo antes do tempo. Segundo o SINDALCOOL (Sindicato da Indústria do Alcool e do Açúcar da Paraíba), o setor sucroalcooleiro, é o segundo maior exportador e o maior empregador na economia do estado. Este setor, segundo a análise do Produto Interno Agrícola (PIA), há uma liderança absoluta e na arrecadação de impostos ele é também o setor econômico que mais arrecada encargos sociais, tributos federais como o IPI, e na arrecadação do estadual, a contribuição do etanol significa cerca de 4,5% do ICMS arrecadado. Segundo os dados do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), incluindo todos os municípios canavieiros, a área total plantada no Estado alcança 140.000 hectares.

Na escolha de um método para a determinação da evapotranspiração devem ser levados em consideração praticidade e precisão, pois, apesar dos métodos teóricos e micrometeorológicos serem baseados em princípios físicos, eles também apresentam limitações, principalmente quanto à precisão instrumental, o que pode restringir a sua utilização. Diversos pesquisadores propuseram modelos indiretos para a estimativa da  $ET_0$ , com as mais diferentes concepções e número de variáveis envolvidas. É necessário saber quais os elementos climáticos disponíveis para poder se escolher o modelo a ser utilizado na estimativa da  $ET_0$ . Dessa forma, verificam-se quais desses elementos podem ser aplicados, uma vez que a utilização dos diferentes métodos para uma determinada cultura fica na dependência dessas variáveis. Atualmente, ocorre certa tendência para a

utilização de estações meteorológicas automatizadas que auxiliam na determinação da evapotranspiração de referência, diminuindo, assim, erros na lâmina de água a ser aplicada à cultura. Quando programadas, essas estações podem utilizar o método de Penman-Monteith para a determinação da  $ET_0$ , porém a maior parte dos produtores utiliza outros métodos porque não dispõe desses equipamentos, impossibilitando-os de determinar de forma confiável a demanda atmosférica pelo método-padrão estabelecido pela FAO (*Food and Agriculture Organization*). Entretanto, não existe nenhum método padrão para a estimativa da evapotranspiração de culturas, o que torna importante a avaliação de se determinar o melhor e mais preciso de acordo com as disponibilidades de dados e tipo de cultura. Dessa forma, o presente trabalho tem o objetivo de comparar os valores da evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar obtidos com base em quatro diferentes métodos de estimativa, com o intuito de encontrar um método eficiente e com pouca exigência de medições ambientais.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. Necessidades hídricas da cana-de-açúcar**

A produtividade das culturas é fortemente influenciada pela disponibilidade de água e de nutrientes. Com relação à água, nem sempre as chuvas atendem a real necessidade hídrica das plantas; surge, daí, a importância da irrigação a qual, quando bem planejada, tem retorno econômico inquestionável. O solo é que dá o suporte para fornecimento de nutrientes para a planta e não é raro o mesmo não os apresentar na quantidade de que a cultura precisa para o seu pleno desenvolvimento, o que ressalta a importância da adubação, destacando que nesta prática se deve observar o comportamento de cada nutriente com relação à cultura (Azevedo, 2002). Associada à adubação, a irrigação é uma importante prática para o aumento da produtividade da cana-de-açúcar (Dantas Neto et al., 2006). O conhecimento da quantidade de água requerida pelas culturas constitui-se em aspecto importante na agricultura irrigada para que haja uma adequada programação de manejo de irrigação. Segundo Hernandez (1994), existem várias metodologias e critérios para se estabelecer programas de irrigação, que vão desde simples turnos de rega aos completos esquemas de integração do sistema solo-água-planta-atmosfera. Entretanto, reconhece-se que, ao agricultor, devem ser fornecidas técnicas simples, mas com precisão suficiente para possibilitarem, no campo, a determinação criteriosa do momento e da quantidade de água a ser aplicada. De acordo com Howell et al. (1990) apud Sousa et al. (1999), a frequência e a quantidade de água de aplicada, a uniformidade e a eficiência de aplicação, juntamente com a precipitação, são parâmetros que ditam a relação entre água e produtividade potencial da cultura. Ao longo de 15 anos de pesquisa em irrigação localizada subsuperficial em cana-de-açúcar na Venezuela, Leiva & Barrantes (1998) indicam que a frequência de irrigação deve ser de 3, 4 ou 5 dias. Scardua (1985) demonstrou a viabilidade técnico-econômica da irrigação suplementar de cana-de-açúcar, principalmente no primeiro estágio de seu desenvolvimento. Wiedenfeld (2000) observou que a cana-de-açúcar submetida ao estresse hídrico nos terceiro e quarto períodos do seu ciclo, 257 a 272 e 302 a 347 dias após o plantio, respectivamente, teve redução de 8,3 a 15% no rendimento.

A cana-de-açúcar é cultivada, principalmente, em clima tropical onde se alternam as estações secas e úmidas. Para Doorembos & Kassan (1979), a demanda hídrica da cultura está entre 1500 e 2500 mm. Para Alfonsi et al. (1987), nas áreas canavieiras do

Brasil, o total de precipitação pluviométrica anual varia de 1100 a 1500 mm/ano. Portanto, para que se possa obter produtividades favoráveis, atingindo o potencial genético da cultura, com o auxílio da irrigação, seja ela suplementar ou não, faz-se necessário o respeito a alguns critérios essenciais à otimização do uso desse recurso natural. O manejo hídrico dessa cultura deve ser realizado com eficiência, ou seja, com suprimentos hídricos adequados durante o desenvolvimento vegetativo, principalmente nas fases de perfilhamento e alongamento dos colmos, e alguma restrição no período de maturação, para forçar o repouso fisiológico e o enriquecimento em sacarose (Inman-Bamber et al., 2002).

O conhecimento dos valores precisos do coeficiente de cultura ( $K_c$ ) é particularmente importante para a determinação das necessidades hídricas das culturas, tanto em termos de manejo da água de irrigação, como também no planejamento de sistemas hidroagrícolas, assumindo, atualmente, grande importância em modelagem agrometeorológica. Muitas pesquisas já foram realizadas visando à determinação mais precisa do consumo hídrico de diferentes culturas no Brasil. Entretanto, nenhuma delas trata da comparação de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração da cana-de-açúcar. Segundo Pereira & Allen (1997), a medida direta da evapotranspiração é extremamente onerosa e difícil. Difícil, porque exige instalações e equipamentos especiais e onerosos, porque tais estruturas são de alto custo, justificando-se apenas em condições experimentais. Os autores apontam vários métodos de estimativa aptos ao uso, dependendo dos dados climáticos disponíveis no local de estudo. Dessa forma, a estimativa da evapotranspiração pode variar com a precisão dos dados obtidos, tamanho da série histórica, as condições climáticas e o método de estimativa utilizado, podendo influenciar na eficiência do sistema de irrigação, em razão do dimensionamento inadequado desse sistema, afetando muitas vezes a produção agrícola (Araújo et al., 2007).

## **2.2. Aspectos climáticos para o cultivo da cana-de-açúcar**

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) é uma planta alógama, pertencente à divisão Magnoliophyta, classe Liliopsida, sub-classe Commelinidae, ordem Cyperales, família Poaceae, tribo Andropogonae e subtribo Saccharinae (Castro, 2001). Ela é originária do Sudeste Asiático, na grande região da Nova Guiné e Indonésia (Daniels & Roach, 1987). Geralmente é cultivada a espécie *Saccharum officinarum* (L.); entretanto, os cultivares desta espécie passaram a sofrer dificuldades de adaptação ecológica e severos danos

provocados por doenças. Por outro lado, híbridos interespecíficos, oriundos dos programas de melhoramento genético, resistentes e melhor adaptados para diversas condições ambientais permitiram a expansão da cultura pelo mundo (Figueiredo et al., 1995; Matsuoka et al., 1999). Já em 1533, ela era cultivada na Capitania de São Vicente, no litoral paulista, próximo à cidade de Santos, dando origem ao primeiro engenho de açúcar, denominado São Jorge dos Éramos. Desde então, as indústrias cuja matéria-prima é a cana-de-açúcar se multiplicaram e se modernizaram, levando o País à hegemonia mundial na produção de açúcar e álcool (Chaves et al., 2003). A cana-de-açúcar é cultivada numa ampla faixa, desde 35°N a 30°S, e em altitudes que variam do nível do mar a 1.000 m de altitude (Magalhães, 1987, Alfonsi et al., 1987).

Segundo Azevedo (2002), a Paraíba ocupa a sexta posição no cenário nacional, produzindo 8,9 milhões de toneladas, o que lhe confere uma receita anual de R\$ 120 milhões. Com esta cifra, a cana-de-açúcar é o produto, dentro da agropecuária, mais importante do estado. Mesmo possuindo a sexta posição no cenário nacional em produção, a Paraíba possui a mais baixa produtividade entre os oito maiores Estados produtores de cana-de-açúcar no Brasil, sendo que a baixa pluviosidade e o empobrecimento do solo apresentam-se como os principais fatores desta baixa produtividade. Estes dois fatores apontam para uma política de pesquisa com irrigação e adubação das culturas visando resultados diretos como o aumento da produtividade e rendimento de açúcar e de álcool, e como efeito indireto, diminuição da área plantada minimizando custos de transporte, insumos, plantio e tratamentos culturais, além de liberar área para diversificação e/ou rotação e preservação de áreas (Carvalho et al., 2009). A cana-de-açúcar, em função do seu ciclo perene, sofre a influência das variações climáticas durante todo o ano. Para atingir alta produção de sacarose, a planta precisa encontrar épocas com condições de temperatura e umidade adequadas para permitir o máximo crescimento na fase vegetativa, seguida de um período com restrição hídrica ou térmica para favorecer o acúmulo de sacarose no colmo na época do corte. A cana-de-açúcar encontra suas melhores condições quando ocorre um período quente e úmido, com intensa radiação solar durante a fase de crescimento, seguido de um período seco durante as fases de maturação e colheita. No Brasil, em função da sua extensão territorial, existem as mais variadas condições climáticas e, possivelmente, é o único país com duas épocas de colheita anuais: de setembro a abril no Norte e Nordeste e de maio a dezembro no Centro-sul correspondendo às épocas secas nessas regiões (Alfonsi et al., 1987). Doorenbos & Kassan (1994) relatam que os rendimentos da cana produzida em condições de sequeiro nos trópicos úmidos, variam entre 70 a 100 t ha<sup>-1</sup> de cana-de-açúcar

e, nos trópicos e subtropicais secos, com irrigação, os rendimentos variam entre 100 e 150 t ha<sup>-1</sup> e são considerados bons. Os autores comentam, ainda, que o teor de açúcar parece diminuir ligeiramente com o aumento dos rendimentos da cultura e, para isto, deve-se evitar o crescimento exuberante durante a maturação da cana, o que pode ser obtido com temperaturas baixas, nível reduzido de nitrogênio e suprimento limitado de água. E a pureza do suco é afetada positivamente por temperatura abaixo da mínima, durante várias semanas antes da colheita. No que se refere aos fatores climáticos para a produção da cana-de-açúcar, a temperatura é, provavelmente, o de maior importância. A temperatura basal para a cana-de-açúcar está em torno de 20°C. A temperatura ótima situa-se entre 22 a 30°C, sendo que nestas condições a cultura apresenta seu máximo crescimento. Acima de 38°C não há crescimento (Barbieri & Villa Nova, 1977; Doorembos & Kassan, 1979; Magalhães, 1987).

A cana-de-açúcar é considerada uma planta C<sub>4</sub>, as quais em geral possuem maior eficiência fotossintética devido, provavelmente, à compartimentação de enzimas e a característica anatômica das folhas, tendo como consequência taxa de fotorespiração baixa ou ausente (Machado, 1987). Além disso, a cana-de-açúcar apresentando alta eficiência de conversão de energia radiante em energia química. Ainda segundo Machado (1987), a produtividade da cana-de-açúcar depende da eficiência da integração do seu sistema produtivo formado pelas folhas fotossinteticamente ativas, do escoamento e distribuição do produto fotossintetizador, do consumo pela planta no seu desenvolvimento e reprodução e do acúmulo e armazenamento de sacarose.

A radiação global que atinge a superfície da Terra é composta basicamente por duas partes: radiação solar direta e radiação difusa na atmosfera. Percentualmente, da radiação que atinge o topo da atmosfera, 25% é radiação direta e 26% atinge a superfície como radiação difusa. Assim, grande parte da radiação disponível para as plantas está na forma de radiação difusa. Os efeitos adicionais da radiação à fotossíntese sobre o desenvolvimento das plantas tornam mais complexas a análise da fotossíntese em relação à produtividade, e nem sempre a manipulação da radiação ou do sistema de captação de radiação visando aumentar a eficiência fotossintética leva a um incremento de produtividade agrícola (Bernardes, 1987). Para a cana-de-açúcar, a relação entre taxa de fotossíntese, por unidade de área foliar por unidade de superfície de terreno, e a produtividade ainda depende de melhor entendimento dos aspectos fisiológicos relacionados a transporte e acumulação dos metabólitos, principalmente da sacarose. Para isso, estudos sobre as relações entre a eficiência dos sítios de produção (folhas) e dos sítios de acumulação (colmos) durante o

crescimento da cultura devem ser realizados para serem relacionados com aspectos climáticos, principalmente no que se refere à captura da radiação pela planta (Magalhães, 1987).

### **2.3. Consumo hídrico da cana-de-açúcar**

A adoção de técnicas racionais de manejo conservacionista do solo e da água é de fundamental importância para a sustentabilidade, de tal forma que se possa, economicamente, manter ao longo do tempo esses recursos com quantidade e qualidade suficientes para a manutenção de níveis satisfatórios de produtividade (Wutke et al., 2000). Dessa forma, os recursos hídricos de uma região devem ser utilizados de forma racional por toda a sociedade, uma vez que a água é a substância mais importante para a sobrevivência das espécies animal e vegetal, ressaltando-se que a necessidade do controle das reservas hídricas é fundamental para a existência de vida no planeta (Mendonça & Dantas, 2010).

Vários trabalhos têm sido conduzidos para estudar a influência do clima na produtividade da cana-de-açúcar, principalmente envolvendo temperatura e disponibilidade de água (Ometto, 1974; Thompson, 1976; Ometto, 1980; Matioli, 1998; Dias et al., 1999; Rojas, 1999; Scarpari, 2002). O conhecimento de como as plantas utiliza a água no solo e de como respondem aos níveis de armazenagem a partir do balanço hídrico, pode ser uma saída viável para o estabelecimento de estratégias eficazes de manejo visando ao melhor uso possível das reservas de água no solo pelas culturas. O movimento cíclico da água na lavoura começa com a sua penetração no solo por meio da infiltração, continua com seu armazenamento temporário na zona do sistema radicular e termina com sua remoção do solo por meio da drenagem, da evaporação e da absorção pelas raízes (Hillel, 1970). O que é feito através do balanço hídrico nada mais é do que se tentar quantificar essas entradas e saídas de água no sistema solo-planta. A disponibilidade de água para a planta de cana-de-açúcar é o principal fator climático causador de variabilidade, ano a ano, da sua produtividade. Entretanto, em função das variações locais de clima e de variedades, é difícil estabelecer uma relação entre produção e consumo de água pela cana-de-açúcar. Segundo Scardua & Rosenfeld (1987) esse consumo também varia em função do estágio fenológico, do ciclo da cultura (cana planta ou cana soca), das condições climáticas, da água disponível no solo entre outros fatores.

Os métodos mais comuns que objetivam fazer as estimativas da evapotranspiração de culturas são os métodos do balanço hídrico no solo, das correlações turbulentas e o

método do balanço de energia baseado na razão de Bowen. O método do balanço de energia se baseia nas análises do balanço energético dos ganhos e perdas de energia térmica radiativa, condutiva e convectiva por uma superfície evaporante. A evapotranspiração estimada pelo balanço de energia apresenta valores bastante satisfatórios desde que se tenham os devidos cuidados na instalação do equipamento para evitar a circulação de calor entre a área de estudo com a superfície seca adjacente (Kang et al., 2008). O método da razão de Bowen tem sido intensamente utilizado por diversos pesquisadores, com a finalidade de resolver a equação do balanço de energia sobre culturas e, assim, determinar a evapotranspiração, isso quando se dispõe da instrumentação necessária às medições locais e em alta frequência do saldo de radiação e dos gradientes verticais de temperatura e pressão de vapor do ar (Trambouze et al., 1998; Azevedo et al., 2003; Silva et al., 2007; Borges et al., 2008; Souza et al., 2008). Neste contexto, surge o método de Priestley & Taylor que também é utilizado na estimativa da evapotranspiração, porém com menor exigência de variáveis ambientais.

#### **2.4. Balanço hídrico do solo**

A água é um dos principais fatores de produção agrícola, sendo essencial para o desenvolvimento sustentável da atividade agrícola. Para o conhecimento do ciclo hidrológico de uma região, contabilizado pelo balanço hídrico, tem-se que proceder às informações da cultura – profundidade das raízes, do solo – capacidade de armazenamento de água– e do clima, principalmente a precipitação (entrada de água) e a evapotranspiração (saída de água) (Araújo et al., 2007).

Para se efetuar o balanço hídrico de uma cultura é necessário, portanto, computar as entradas de água no solo via precipitação pluvial ou irrigação, a partir da sua infiltração na superfície, e as saídas, representadas pela drenagem interna, evapotranspiração e deflúvio superficial em um volume de solo, com base na configuração do sistema radicular da cultura em estudo, em determinado período de tempo; se a quantidade de água que entra no tempo considerado for maior que a quantidade que sai durante o mesmo período, o saldo será positivo e, caso contrário, será negativo. Tanto o saldo positivo como o negativo foram medidos pela variação de armazenagem de água no perfil do solo no período considerado (Libardi, 1995). O estudo dessa contabilização da água do solo é chamado balanço hídrico (BH), sendo o seu conhecimento muito importante, tanto na determinação

imediate da necessidade hídrica de uma cultura quanto na tomada de decisões em projetos agrícolas. A importância do balanço hídrico como ferramenta para avaliar a intensidade das saídas e entradas de água no solo e, por conseguinte, para definição dos períodos mais prováveis de déficit hídrico para a cultura, está relacionada não só ao conhecimento dos fatores que o compõem (evapotranspiração, precipitação, drenagem interna ou ascensão capilar) como, também, ao conhecimento das características da planta, principalmente da sua fenologia, que representa o ponto de partida para a interpretação coerente dos resultados do balanço (Cintra et al., 2000). Esse método é caracterizado, também, como indicador do potencial climático de uma região para uma cultura qualquer (Ometto, 1989; Pereira et al., 2002). Genericamente, as principais fontes de entrada de água no sistema são: precipitação, orvalho, escoamento superficial, drenagem lateral, ascensão capilar e irrigação. As saídas principais são: evapotranspiração, escoamento superficial, drenagem lateral e drenagem profunda (Pereira et al., 2002). O termo "Evapotranspiração" foi utilizado por Thornthwaite no início da década de 40 do século passado, para expressar esta ocorrência simultânea dos processos de evaporação da água no solo e da transpiração das plantas. Ela é controlada pelo balanço de energia, pela demanda atmosférica e pelo suprimento de água do solo às plantas. O termo evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) foi definido por Doorenbos e Pruitt (1977) como aquela que ocorre em uma extensa superfície coberta com grama de 0,08 a 0,15 m, em ativo crescimento, cobrindo totalmente o solo e sem deficiência de água. Pesquisadores, especialistas em agrometeorologia, de vários países, concluíram em 1990 que o conceito de ET<sub>o</sub> empregado apresentava problemas, sobretudo relacionados à variabilidade das culturas de referência atualmente em uso, levando a erros e à existência de dificuldades experimentais para contrastá-los. Assim, um novo conceito de ET<sub>o</sub> foi proposto: trata-se da evapotranspiração que ocorre sobre uma cultura hipotética com altura de 0,12 m, de resistência aerodinâmica da superfície de 70  $\text{sm}^{-1}$  e albedo de 0,23. Essa parametrização foi incutida na equação de Penman-Monteith e apontada como padrão (Allen et al., 1998 ; Araújo et al, 2007).

São de fundamental importância para o planejamento e manejo, das áreas irrigadas, as estimativas das necessidades hídricas pelas culturas. Dessa forma, informações sobre a ET<sub>o</sub>, que levam a estimativas da evapotranspiração das culturas (ET<sub>c</sub>), acabam sendo ferramentas importantes no manejo da irrigação. Segundo Matzenauer (1999) a determinação da evapotranspiração de culturas agrícolas, sem limitação hídrica é de grande interesse nas pesquisas agrônômicas. A evapotranspiração depende da demanda evaporativa da atmosfera, caracterizada pela radiação solar, velocidade do vento, umidade

e temperatura do ar. Desses elementos, a radiação solar é um dos mais importantes, conseqüentemente para a evapotranspiração que é diretamente dependente da disponibilidade de energia e de água no solo. De acordo com Angelocci (2000) a opção prática para a determinação da exigência hídrica de culturas é o uso de coeficientes de cultura ( $K_c$ ), que relacionam a evapotranspiração máxima da cultura  $ET_m$  com a evapotranspiração de referência ou potencial  $ET_o$ . O  $K_c$  é um fator importante na determinação do consumo de água ideal para a cultura durante todo o seu ciclo, constituindo-se num elemento imprescindível para o manejo mais racional da irrigação. O  $K_c$  depende do estágio fenológico da cultura, do sistema de irrigação utilizado, da densidade de plantio e das condições atmosféricas predominantes. O consumo de água pelas comunidades vegetais é uma informação importante nos estudos agrícolas, em especial na avaliação da produtividade das culturas. Para prover as disponibilidades hídricas no solo, necessárias à agricultura, não basta considerar os dados pluviométricos do período. Eles correspondem apenas ao processo de suprimento de água natural para o uso das plantas. É necessário considerar também os processos de perda de água do solo para a atmosfera fazendo-se o balanço hídrico da água no solo. Este método tem sido comumente utilizado na estimativa da evapotranspiração de diversas culturas, inclusive aquelas de grande porte (Silva, 2000; Azevedo et al., 2003; Sousa, 2005; Moura, 2005).

Chang (1968), em seu trabalho, afirma que quando se desconsidera a quantidade de água usada nas atividades metabólicas, a evapotranspiração será igual ao consumo de água pelas plantas. Estão associados ao processo de evapotranspiração pelo menos dois conceitos: a evapotranspiração potencial (ETP) e a evapotranspiração real (ETR).

A evapotranspiração potencial (ETP) é a quantidade de água que seria utilizada numa superfície vegetada com grama com plena disponibilidade de água no solo. A evapotranspiração nessas condições é tomada como referência quando se quer conhecer a evapotranspiração de uma cultura e condição não padrão. Assim a evapotranspiração potencial é um valor indicativo da demanda evapotranspirativa da atmosfera de um local em um dado período. Thornthwaite (1948) introduziu o conceito de evapotranspiração potencial como sendo a água evaporada de uma superfície totalmente coberta de vegetação rasteira e uniforme sem sofrer deficiência de água. Penman (1948) definiu a evapotranspiração potencial como a quantidade de água evapotranspirada na unidade de tempo de uma pequena superfície gramada, cobrindo o solo uniformemente estando o mesmo sem deficiência de água. A evapotranspiração real (ETR) é a quantidade de água realmente utilizada por uma superfície vegetada com grama, porém com ou sem restrição

hídrica. Quando não há restrição  $ETP=ETR$ , portanto  $ETR \leq ETP$ . Sellers (1985) afirmou que a evapotranspiração é como um processo em que as plantas desempenham um papel ativo e auto-regulador de suas perdas energéticas através das folhas. Para Matzenauer (1992), a evapotranspiração real (ETR) é a perda de água para a atmosfera, por evaporação e transpiração nas condições reais (existentes) de fatores atmosféricos e umidade do solo e pela demanda evaporativa da atmosfera. Os conceitos de ETP e ETR são aplicados somente a uma superfície gramada, portanto não faz sentido referir-se a evapotranspiração potencial de uma cultura (Pereira et al., 1997).

As Nações Unidas, através da FAO, recomendam a utilização da evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) pelo método de Penman-Monteith. A evapotranspiração de referência é uma variável relevante para o planejamento de irrigação, além de fácil obtenção haja vista ser afetada apenas pelos fatores climáticos. Em geral, os métodos de estimativa da evapotranspiração de referência são baseados em variáveis climáticas, muitos deles na temperatura do ar, radiação ou combinado (radiação e temperatura) (Penman, 1948; Thornthwaite, 1948; Priestley & Taylor, 1972; Hargreaves, 1974). Para padronizar o cálculo de  $ET_0$ , a Food and Agriculture Organization (FAO) propôs o método de Penman-Monteith, com base em estudos de uma comissão de especialistas em 1991, que incorpora aspectos termodinâmico e aerodinâmico da cultura, como modelo padrão para quantificar a demanda atmosférica de evapotranspiração. Este método, que tem sido amplamente utilizado em todo o mundo (Silva, 2004; Silva et al., 2005; Borges & Mendiondo, 2007), foi estabelecido para uma cultura hipotética com as seguintes características: resistência estomática de  $70 \text{ s m}^{-1}$ , altura da cultura hipotética fixada em 0,12 m e albedo de 23% (Allen et al., 1998). A evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ) é quantidade de água utilizada por uma cultura, em qualquer fase de seu desenvolvimento, desde o plantio até a colheita, quando não houver restrições hídricas. A  $ET_c$  é função principalmente do Índice de Área Foliar. A  $ET_c$  pode ser obtida pelo produto entre  $ET_0$  e  $K_c$ . O valor de  $K_c$  varia com as fases fenológicas, e também entre espécies e variedades (Pereira et al., 2002).

Para estimar a evapotranspiração da cultura é preciso ajustar o  $ET_0$  através do  $K_c$ . Os coeficientes de cultura para os diferentes estádios de desenvolvimento da cana-de-açúcar foram definidos por Doorenbos & Pruitt (1977) e Doorenbos & Kassam (1979), cujos valores médios são de 0,5 (do plantio até 25% da cobertura do solo), 0,80 (de 25% a 50% de cobertura do solo), 0,95 (de 50% a 75% de cobertura do solo) e de 1,10 (75% a cobertura completa do solo). A irrigação da cana-de-açúcar cultivada em larga escala no Brasil é essencial para o aumento de produtividade. Neste contexto, o uso do balanço

hídrico no solo na estimativa da evapotranspiração é uma ferramenta útil no manejo da irrigação. Brito et al. (2009) avaliaram os componentes da equação do balanço de água em dois Latossolos cultivados com cana-de-açúcar (cana-planta), localizados nos Municípios de Jaboticabal e Pirassununga (São Paulo). Os autores concluíram que nos períodos de alta pluviosidade, a drenagem interna foi significativa, alertando para possíveis problemas no manejo em relação a uma potencial contaminação do lençol freático; e constataram que tanto a evapotranspiração real quanto à eficiência do uso da água foram da mesma ordem de grandeza, independentemente da adubação nitrogenada, enquanto a armazenagem de água no solo foi praticamente a mesma no início e no fim do ciclo estudado. Similarmente, Timm et al. (2002) realizaram análises qualitativas das metodologias para estimar os componentes do balanço hídrico em um solo submetido a diferentes práticas de manejo, em uma área experimental de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum L.*) em Piracicaba, SP, utilizando-se blocos distribuídos ao acaso, com quatro repetições e três tratamentos: solo nu, solo com resíduos de palhico e ponteiros, deixados na superfície do solo após a colheita e solos com resíduos da queima. Esses autores constataram que o escoamento superficial, os fluxos de água nos limites inferiores do volume do solo e as mudanças do armazenamento da água do solo não foram afetadas pelas diferentes práticas de manejo. Além disso, encontrou-se que o escoamento superficial e os fluxos da água do solo são fortemente afetados pela variabilidade espacial das propriedades físicas do solo.

## **2.5. Balanço de energia com base na razão de Bowen**

Diversos estudos sobre o balanço de energia em culturas vêm sendo desenvolvidos, com propósito de avaliar os mecanismos de desenvolvimento que afetam e melhoram a produção. Dentre eles, pode-se destacar estudos efetuados por Villa Nova (1973), Campelo Júnior (1978), Prates et al. (1987), Evett et al. (1992), Cunha & Bergamaschi (1994), Alves et al. (1998), Nobre et al. (1999) e Hayashi (2002).

Bowen (1926) foi o pioneiro nos estudos do balanço da energia sobre uma superfície natural, determinando a razão entre os fluxos de calor latente e sensível emitidos por uma superfície de água, durante o processo de evaporação, em função dos gradientes da pressão do vapor e da temperatura observados sobre a superfície, denominada razão de Bowen. Grande esforço da pesquisa tem sido concentrado na quantificação dos componentes do balanço de energia através da razão de Bowen, já considerado padrão para mensurar os fluxos convectivos de calor latente e sensível (Villa Nova, 1973; Alfonsi et al., 1986;

Fontana et al., 1991; Cunha & Bergamaschi, 1994; Cunha et al., 1996; Alves et al., 1998; Ávila Netto et al., 1999; Cunha, 2001). O método do balanço de energia é considerado um processo racional de estimativa de evapotranspiração de uma superfície, o qual mede a energia disponível em um sistema natural e separa as frações usadas nos diferentes processos, obtendo-se, assim, bons resultados (Villa Nova, 1973). O conhecimento da evapotranspiração ou do fluxo convectivo de calor latente contribui para uma utilização mais racional da água em uma determinada cultura em que as fases críticas de desenvolvimento vegetativo e reprodutivo são limitadas pelo fator hídrico.

O consumo hídrico de um parreiral é uma função complexa dos balanços hídrico do solo e de energia da superfície cultivada (Heilman et al., 1994). Dentre os métodos de determinação da evapotranspiração destaca-se o do balanço de energia, que se baseia no princípio de conservação de energia, em que a energia disponível, geralmente associada à diferença entre o saldo de radiação ( $R_n$ ) e o fluxo de calor no solo ( $G$ ), é repartida entre os processos de evapotranspiração ou calor latente ( $LE$ ) e as trocas devidas ao calor sensível do ar ( $H$ ). Baseado nesse princípio e na razão de Bowen ( $\beta$ ), que relaciona os fluxos  $H$  e  $LE$ , Tanner (1960) apresentou um modelo de estimativa da evapotranspiração de culturas, utilizando a forma simplificada da equação do balanço de energia. Na cultura da videira este método foi empregado por Mathias & Coates (1986), Oliver & Sene (1992), Heilman et al. (1994) e Teixeira et al. (1997).

O fluxo de calor latente ( $LE$ ) envolve transferência de massa da superfície do sistema solo-planta para a atmosfera, sendo o resultado da evaporação ou condensação do vapor d'água e é obtido pelo produto do calor latente de evaporação ou condensação pela massa de água evaporada ou condensada. A evaporação ocorre tanto em superfícies livres de água como em solo úmido e em superfícies vegetadas, quando o ar encontra-se com déficit de saturação de vapor d'água na atmosfera (Moura, 2005). O fluxo de calor sensível ( $H$ ) de uma dada superfície é o resultado da diferença entre as temperaturas do ar e da superfície. Certamente, a temperatura na camada limite varia continuamente com a altura. Próximo à interface, a transferência de calor ocorre por condução. O fluxo de calor sensível geralmente é dirigido para fora da superfície no período diurno quando a superfície está mais aquecida que o ar, e o contrário ocorre durante o período noturno. (Moura, 2005). A evapotranspiração, sob o ponto de vista energético, pode ser considerada como a energia utilizada para transferir água da superfície do solo úmida e do interior das

plantas para a atmosfera, sob a forma de vapor. Neste caso, é chamada de calor latente e é medida como densidade de fluxo de energia ( $W m^{-2}$ ).

## 2.6. Método de Priestley-Taylor

A equação de Priestley & Taylor (1972) é um dos métodos mais comumente empregados na estimativa da evapotranspiração (Xiaoying e Erda, 2005). Nela se emprega o coeficiente de Priestley-Taylor ( $\alpha$ ) que em resumo, representa o controle evaporativo efetuado pela vegetação e é definido como  $\alpha = E/E_{eq}$ , em que E é a taxa de evaporação e  $E_{eq}$  é a taxa de evaporação em equilíbrio (Priestley e Taylor, 1972). Alguns métodos modificados estimam  $\alpha$  em função de variáveis ambientais. Entretanto, nenhum é considerado um método único e funcional para determinação de  $\alpha$  e deve ser determinada empiricamente (Sumner e Jacobs, 2005). O método de Priestley-Taylor despreza a influência do déficit de pressão de vapor na evapotranspiração de referência, assumindo que a  $E_{To}$  depende somente da radiação solar e da temperatura do ar. A estimativa da evapotranspiração pelo método de Priestley-Taylor tem sido objeto de discussão devido aos diferentes tipos de cobertura vegetal.

A vantagem do método do Priestley-Taylor é o uso de poucas variáveis para estimar a ET ( $R_n$ , G e temperatura do ar) em relação a outros métodos. A base teórica de  $\alpha$  é relativamente bem conhecida, sabendo-se que  $\alpha$  pode variar substancialmente, dependendo da rugosidade do dossel e do teor de água de superfície. Priestley e Taylor (1972) determinaram valores  $\alpha$  variando de 1,08 (evaporação do solo nu) a 1,32 (evapotranspiração do solo nos vegetais), com valor médio de 1,26, sendo este aplicado principalmente em climas úmidos. Shuttleworth & Calder (1979) avaliando a equação de Priestley-Taylor para estimar a evapotranspiração de floresta, quando concluíram que devido à advecção e à altura da vegetação, o método de Priestley-Taylor não pode ser utilizado indiscriminadamente, sugerindo que o modelo deve ser ajustado empiricamente para cada local de interesse, considerando-se a interceptação de água das chuvas pelo dossel. Por outro lado, analisando observações lisimétricas de evapotranspiração, em condições aparentemente não advectivas, Priestley & Taylor (1972) propuseram uma simplificação do método de Penman (1948), mantendo apenas o termo que contempla o balanço de radiação, corrigido-o por um coeficiente de ajuste ( $\alpha$ ). Em suma, ele considera a radiação líquida particionada entre fluxo de calor e evaporação (Viswanadham et al., 1991).

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. Descrição da área estudada

Os experimentos de campo foram realizados na Fazenda Capim II com a cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum L.*). Essa destilaria, que pertence ao grupo UNIAGRO, fica situada no município de Capim, PB. A variedade de cana-de-açúcar estudada foi a RB 92579, muito difundida na região Nordeste do Brasil. A Fazenda Capim II está situada geograficamente em torno da latitude 6°56', longitude 35°07' (Figura 1), e possui uma área irrigada de aproximadamente 600 hectares, com dois pivôs centrais rebocáveis alimentados por uma extensão de 9 km de canal, abastecidos por um manancial com capacidade de 5.000.000 m<sup>3</sup> de água, que se desloca em seis bases de 50 ha cada uma, dentro de uma região propícia ao cultivo desta cultura, em área com altitude de 103 m e temperatura média de 28°C. A precipitação média anual na região é superior a 1500 mm, com seis meses secos; o clima é quente e úmido, com chuvas de outono a inverno (As' segundo Köppen), com seca atenuada e bioclima classificado como Mediterrâneo ou Nordestino quente (Silva et al., 2011). O solo predominante na área experimental é o Argissolo Vermelho Amarelo (Segundo classificação da EMBRAPA 1999), com as seguintes características físicas: franco arenoso; massa específica aparente 1,39 kg dm<sup>-3</sup>, capacidade de campo 0,126 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>; Ponto de murcha permanente 0,061cm<sup>-3</sup>.

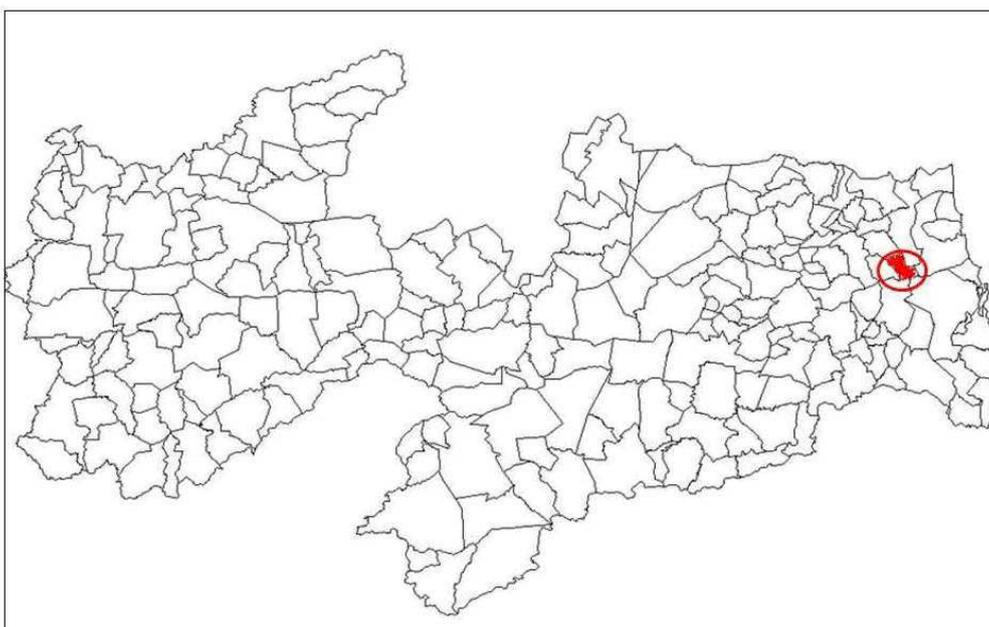


Figura 1. Localização da área de estudo no município de Capim, Paraíba

### 3.2. Tratos culturais e dados experimentais

Durante o período experimental foram mantidos todos os procedimentos de tratamentos culturais adotados pela empresa agroindustrial, tais como o controle de pragas e doenças, capinas e adubação via água de irrigação. Os dados para determinação da evapotranspiração pelos diferentes métodos de estimativa foram obtidos na parcela de sequeiro e os dados para a determinação da evapotranspiração de referência foram obtidos na PCD (Plataforma de Coleta de Dados) do INPE, localizadas na Fazenda Capim II, no Estado da Paraíba.

### 3.3. Evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>)

A evapotranspiração de referência foi calculada pelo método de Penman-Monteith (FAO/56), considerando-se a resistência estomática de 70 sm<sup>-1</sup>, albedo de 23% e a altura da cultura hipotética fixada em 0,12m (Allen et al., 1998):

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

em que:

ET<sub>o</sub> é a evapotranspiração de referência (mm dia<sup>-1</sup>); R<sub>n</sub> (saldo de radiação) e G (densidade do fluxo de calor no solo) são expressos em MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>;

Δ é a declinação da curva de saturação do vapor da água kPa °C<sup>-1</sup>;

U<sub>2</sub> é a velocidade do vento (média diária) a 2 m acima da superfície do solo m s<sup>-1</sup>;

T é a temperatura do ar média diária °C;

e<sub>s</sub> é a pressão de saturação do vapor de água kPa;

e<sub>a</sub> é a pressão real do vapor kPa;

γ é o fator psicrométrico MJ kg<sup>-1</sup>.

### 3.4. Evapotranspiração da cultura (ET<sub>c</sub>)

A evapotranspiração da cana-de-açúcar foi obtida pelo método do balanço de energia baseado na razão de Bowen, balanço hídrico no solo e pelo método de Priestley-Taylor, abaixo descrito.

### 3.4.1. Método do balanço de energia

Essa técnica é baseada no princípio de conservação de energia, dado pela seguinte expressão (Rosenberg et al., 1983; Silva et al., 2011):

$$R_n + LE + H + G + S_d + F = 0 \quad (2)$$

em que:

$R_n$  é o saldo de radiação;

$LE$  e  $H$  são os fluxos verticais de calor latente e sensível, respectivamente;

$G$  o fluxo de calor no solo;

$S_d$  é a energia armazenada no sistema solo-dossel vegetativo;

$F$  é a energia utilizada no processo fotossintético.

Os termos  $S_d$  e  $F$  não foram considerados por representar menos de 2% do saldo de radiação (Heilman et al., 1994). Todos os termos da Eq. 2 são expressos em  $W m^{-2}$ . O balanço de energia foi efetuado sobre o dossel da cana-de-açúcar, para um volume de controle compreendido entre a profundidade de 0,2 m do solo e a altura do psicrômetro mais elevado, que foram ajustados de acordo com o crescimento da cultura. Os fluxos verticais que chegam foram considerados positivos e os que saem do volume de controle foram considerados negativos.

#### *Fluxo de calor latente*

O fluxo de calor latente ( $LE$ ) foi obtido substituindo-se a razão de Bowen na Eq. 2, ou seja:

$$LE = \frac{R_n - G}{1 - \beta} \quad (3)$$

A equação acima permite a estimativa de  $LE$  com base em medições do fluxo de calor sensível. O termo  $\beta$ , que é o termo da razão de Bowen, corresponde à fração de energia entre os fluxos de calor sensível e calor latente, utilizado por Silva et al, (2011):

$$\beta = \frac{H}{LE} \quad (4)$$

A Eq 4, pode ser escrita da seguinte forma:

$$\beta = \frac{H}{LE} = \frac{\bar{P}C_p}{L\varepsilon} \left( \frac{K_h}{K_w} \right) \frac{\partial T / \partial Z}{\partial e / \partial Z} \quad (5)$$

em que  $P$  é a pressão atmosférica (kPa);  $K_h$  e  $K_w$  são, respectivamente, os coeficientes de transferência nos processos de difusão turbulenta de calor sensível e latente, expressos em  $m^2 s^{-1}$ ,  $\varepsilon = 0,622$  e  $\gamma$  o coeficiente psicrométrico ( $hPa \text{ } ^\circ C^{-1}$ ), obtido pela expressão:

$$\gamma = \frac{\bar{P}C_p}{0,662L} \quad (6)$$

em que  $C_p = 1,0032 \text{ J g}^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$ , representa o calor específico do ar a pressão constante,  $\bar{P}$  é a pressão atmosférica média a superfície (hPa) e  $L$  o calor latente de vaporização ( $MJ.g^{-1}$ ) obtido por (Wright, 1982) como:

$$L = 2,487 - 0,51T_a \quad (7)$$

em que  $T_a$  é a temperatura do ar ( $^\circ C$ ). Considerando-se a igualdade entre  $K_h$  e  $K_w$  e  $(\partial T / \partial Z) / (\partial e_a / \partial Z) \approx \Delta T / \Delta e_a$ ; sendo  $\Delta T = T_2 - T_1$  e  $\Delta e_a = e_2 - e_1$  as diferenças de temperatura do ar e pressão de vapor d'água na camada de ar acima da copa das plantas, respectivamente, a Eq. 5 foi simplificada para:

$$\beta \approx \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e_a} \quad (8)$$

A pressão parcial de vapor d'água foi calculada em dois níveis acima da copa das plantas pela equação de Ferrel, da seguinte forma:

$$e(t_a) = e_s(t_u) - 0,00066(1 + 0,00115t_u)(t_a - t_u)\bar{P} \quad (9)$$

em que  $t_u$  e  $t_a$  são as temperaturas dos bulbos molhado e seco, respectivamente, expressas em °C,  $\bar{P}$  a pressão atmosférica média (hPa) e  $e_s(t_u)$  é a pressão de saturação do vapor d'água (hPa), que foi calculada pela equação de Tetens, apresentada por Rosenberg et al. (1983), como:

$$e_s(t_u) = 6,1078 \exp \frac{17,269 \cdot t_u}{237,3 + t_u} \quad (10)$$

Os valores de  $\beta$  passaram por uma análise de consistência de dados conforme estabelecido por Unland et al. (1996); tal procedimento ocorre quando  $\beta$  se aproximou de -1, resultando em valores incorretos de LE.

#### **3.4.1.1. Medições ambientais para o balanço de energia**

No interior da parcela experimental foi montada uma torre micrometeorológica para a instalação dos seguintes instrumentos: dois anemômetros de conchas (modelo 03001, marca Young), nos níveis de 0,5 m e 2,0 m acima da copa das plantas, para medição da velocidade vento; dois radiômetros (modelo CM3, marca Kipp & Zonen), a 1,95 m, para medições da radiação solar incidente e refletida acima do dossel vegetativo; um saldo radiômetro (modelo NR lite, marca Kipp & Zonen) posicionado sobre a copa das plantas para medição do saldo de radiação; dois psicrômetros aspirados à base de cobre-constantan devidamente calibrados, para medição das temperaturas dos bulbos seco e úmido, situados a 0,5 e 2,0 m acima do dossel vegetativo e um sensor para medição da temperatura e umidade relativa do ar (modelo HMP45C, marca Campbell Scientific, Inc.). O perfil vertical da temperatura do ar foi medido no interior do dossel da planta, por meio de termopares de cobre-constantan instalados a 1,0; 2,0 e 3,0 m acima da superfície do solo. Todos os sensores foram conectados a um sistema automático de aquisição e armazenamento de dados (Data logger CR 10X, Campbell Scientific, Inc.), com uma placa multiplexadora de canais, programado para efetuar leitura dos sensores a cada cinco segundos e extrair médias a cada 15 min. Foram instalados no solo dois fluxímetros (modelo HFT3, marca Campbell Scientific, Inc.) para medir do fluxo de calor no solo (G), posicionados a 0,02 m de profundidade, no meio das linhas e entre plantas. Esses dados

foram utilizados para elaboração mais completa possível do balanço de energia com base no método da razão de Bowen.

### 3.4.2. Método de Priestley-Taylor

O fluxo de calor latente (LE), pelo método de Priestley-Taylor (1972), foram obtidos pela equação:

$$LE = \alpha \left( \frac{s}{s + \gamma} \right) (R_n - G) \quad (11)$$

em que  $\alpha$  = o coeficiente do Priestley-Taylor (usualmente usado como 1,26),  $s$  = inclinação da curva da pressão do vapor de saturação “versus” temperatura,  $\gamma$  = constante psicrométrica,  $R_n$  é o saldo de radiação e  $G$  é o fluxo de calor no solo, medidos pelos sensores micrometeorológicos. A vantagem do método de Priestley-Taylor é a necessidade de poucos dados ( $R_n$ ,  $G$  e temperatura ambiente) para se estimar LE (Priestley & Taylor, 1972). Entretanto, a base teórica de  $\alpha$  não é bem esclarecida podendo variar substancialmente dependendo da rugosidade do dossel e da umidade da superfície do solo (Shuttleworth et al., 1984; Xu & Singh, 2000).

Os valores de LE expressos em densidades de fluxo ( $W m^{-2}$ ) foram convertidos em mm/dia com vistas a comparação com os valores da ET pelos demais métodos analisados neste estudo. Assim, o coeficiente  $\alpha$  de Priestley-Taylor foi estimado após rearranjo da Eq. 11, utilizando-se os valores da evapotranspiração pelos métodos do balanço de energia balanço hídrico e do coeficiente de cultivo.

#### 3.4.2.1. Medições ambientais para Priestley-Taylor

Os valores das variáveis meteorológicas coletadas na torre micrometeorológica instalada no interior do canavial na Fazenda Capim II, localizada no município de Capim, também foram utilizados para se obter o fluxo de calor latente da cana-de-açúcar pelo método de Priestley-Taylor.

### 3.4.3. Método do coeficiente de cultivo

Os valores da evapotranspiração da cana-de-açúcar pelo método do coeficiente de cultivo foram obtidos pelo produto entre a evapotranspiração de referência e o coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) obtidos por Silva et al. (2012) para o mesmo site experimental. Esses valores do  $K_c$  constam na Tabela 1. Assim, a evapotranspiração da cana-de-açúcar pelo método do coeficiente de cultivo foi obtida por:

$$ET_c = ET_o \cdot K_c \quad (12)$$

Tabela 1. Faixa de variação do coeficiente da cultura ( $K_c$ ) da cana de açúcar em função dos estádios de desenvolvimento da cultura

<b>Estádio de desenvolvimento</b>	<b>Dias</b>	<b><math>K_c</math></b>
Inicial	30	0,15
Desenvolvimento	90	0,79
Médio	150	0,96
Final	90	0,79

### 3.4.4. Método do balanço hídrico no solo

A evapotranspiração da cana-de-açúcar ( $ET_c$ ) foi também determinada pelo método do balanço hídrico no solo, expresso por (Libardi, 1994):

$$ET_c = P + I + A - D \pm \Delta W \pm R \quad (13)$$

em que  $P$  é a precipitação pluviométrica;  $I$  é a lâmina de irrigação;  $A$  é a ascensão capilar;  $D$  é a drenagem profunda;  $\Delta W$  é a variação da lâmina de água disponível no solo;  $R$  é o escoamento superficial. Todos os componentes da Eq. (13) são expressos em  $\text{mm d}^{-1}$ . O escoamento superficial foi considerado nulo, visto que a topografia do terreno é plana,  $P$  foi monitorada com um pluviômetro instalado na área experimental e  $\Delta W$  determinado com base no perfil de umidade do solo.

O volume de controle considerado para elaboração do balanço hídrico corresponde à camada de solo compreendida entre a superfície e a profundidade efetiva do sistema radicular. A partir da trincheira aberta no interior da parcela, foi determinada a profundidade média do sistema radicular da cultura que foi de 0,6 metros.

O armazenamento de água no solo ( $W$ ), em mm, durante um dado intervalo de tempo foi calculado usando-se a seguinte equação:

$$W_t = \int_0^L \theta(z) dz = \bar{\theta} L \quad (14)$$

em que  $\bar{\theta}$  é a umidade do solo média até a profundidade considerada ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) e  $L$  a espessura da camada de solo (cm). Durante o intervalo de tempo considerado, a variação do armazenamento de água no solo ( $\Delta W$ ), expressa em cm, foi obtida por:

$$\Delta W = W_t - W_{t-1} \quad (15)$$

em que  $\Delta W_t$  e  $\Delta W_{t-1}$  representam os armazenamentos de água no perfil do solo nos instantes  $t$  e  $t-1$ , respectivamente.

A drenagem de água do solo foi determinada de acordo com os procedimentos estabelecidos por Allen et al. (1998).

#### **3.4.4.1. Medições ambientais para o balanço hídrico no solo**

A umidade do solo foi monitorada utilizando-se sondas TDR (Frequency Domain Reflectometry), modelo PR2/6, Delta-T (Devices Ltd., Burwell, Cambridge, UK), com três tubos de acesso, instalados a 0,20 m de cada ponto de observação, nas profundidades de 10, 20, 30, 40, 60, 70, 80, 90 e 100 cm. As medições da umidade do solo foram realizadas a cada 2-3 dias durante o ciclo da cultura.

As análises das características físicas e químicas do solo da área experimental foram realizadas com base em amostras indeformadas, coletadas a partir da trincheira aberta no interior da parcela experimental nas camadas de solo: 0,00-0,20; 0,20-0,40; 0,40-0,60; 0,60-0,80; 0,80-1,00 m, com três repetições. As amostras foram utilizadas para determinação da densidade global, textura e a curva de retenção de água no solo. A

condutividade hidráulica do solo da área experimental foi determinada com base em amostras coletadas na camada de solo com a maior concentração de raízes. As análises de solo foram realizadas no Laboratório de Solos Sociedade de Investigações Florestais (SIF), vinculado à Universidade Federal de Viçosa, no Estado de Minas Gerais.

### 3.5. Análise estatística

Os dados diários da evapotranspiração da cana-de-açúcar obtidos com base no balanço hídrico no solo (dados observados) foram comparados com aqueles obtidos com base no método da razão de Bowen e de Priestley-Taylor, utilizando-se o coeficiente de determinação, erro médio dos desvios (EMD) e a raiz quadrada do quadrado médio do erro normalizado (RQMDN), conforme utilizados por Silva et al. (2010):

$$\text{EMD} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\text{ET}_{\text{est}} - \text{ET}_{\text{obs}}}{n} \right) \quad (16)$$

$$\text{RQMDN} = \frac{\left[ \sum_{i=1}^n (\text{ET}_{\text{est}} - \text{ET}_{\text{obs}})^2 / n \right]^{1/2}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{ET}_{\text{obs}}} \quad (17)$$

em que  $\text{ET}_{\text{est}}$  = é a evapotranspiração da cana-de-açúcar estimada como base nos métodos do balanço de energia, pelo método de Priestley-Taylor e coeficiente de cultivo.  $\text{ET}_{\text{obs}}$  = evapotranspiração obtida com base no método do balanço hídrico no solo e  $n$  é o número de dados da série temporal. Os valores de RQMDN (%) são sempre positivos e próximos de zero no caso do ajuste ideal. Quanto menor o valor absoluto de EMD, melhor a estimativa. Porém, valores positivos indicam a quantidade média de superestimativa dos modelos e negativos, o contrário.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As médias mensais da evapotranspiração estimadas por diferentes métodos são exibidas na Tabela 2. O maior valor da evapotranspiração da cana-de-açúcar foi obtida pelo método do balanço hídrico do solo ( $ET_{BH}$ ), com valor máximo de 282,6 mm durante o mês de dezembro de 2009 e mínimo de 26,5 mm no mês de outubro do mesmo ano. Os métodos do balanço de energia ( $ET_{BE}$ ), Priestley & Taylor ( $ET_{PT}$ ) e aquele derivado do coeficiente de cultivo ( $ET_{Kc}$ ) também apresentaram os maiores valores no mês de dezembro e mínimos no mês de outubro de 2009, devido a alta demanda atmosférica. Por outro lado, a menor média do período da evapotranspiração foi obtida pelo método de Priestley-Taylor, representado 77,2% dos valores obtidos pelo método do balanço hídrico do solo (BH); enquanto que os métodos  $ET_{BE}$  e  $ET_{Kc}$  representaram, respectivamente, 85,5 e 97,2% do  $ET_{BH}$ .

Tabela 2. Evapotranspiração mensal da cana-de-açúcar (mm/mês) pelos métodos do balanço de energia ( $ET_{BE}$ ), Priestley & Taylor ( $ET_{PT}$ ), método do coeficiente de cultivo ( $ET_{Kc}$ ) e pelo método do balanço hídrico no solo ( $ET_{BH}$ )

	$ET_{BE}$	$ET_{PT}$	$ET_{Kc}$	$ET_{BH}$
<b>Out/09</b>	31,8	31,8	37,0	26,5
<b>Nov/09</b>	110,9	95,6	117,2	64,9
<b>Dez/09</b>	274,5	195,8	250,1	282,6
<b>Jan/10</b>	124,2	95,6	117,2	135,7
<b>Fev/10</b>	114,3	103,1	142,6	133,3
<b>Mar/10</b>	147,1	136,7	162,8	166,7
<b>Abr/10</b>	157,0	151,0	184,5	181,6
<b>Mai/10</b>	133,4	131,1	204,9	186,6
<b>Jun/10</b>	122,3	121,4	161,0	172,4
<b>Jul/10</b>	102,9	100,4	103,4	144,3
<b>Ago/10</b>	81,9	72,8	74,3	105,4
<b>Média</b>	127,3	112,3	141,4	145,5

Os valores do coeficiente de cultivo calculados pelos métodos do balanço de energia, Priestley & Taylor e balanço hídrico do solo são apresentados na Tabela 3. Neste caso, constata-se que o  $Kc$  calculado pelo BH foi o que apresentou os maiores valores e o

de Priestley-Taylor (P-T) os menores valores. O maior valor do Kc pelo método do balanço hídrico ( $K_{c_{BH}}$ ) foi de 1,30 durante o mês de junho de 2010 e o mínimo de 0,28 no mês de outubro de 2009.

O Kc calculado pelos métodos do balanço de energia ( $K_{c_{BE}}$ ) e de Priestley-Taylor ( $K_{c_{PT}}$ ) apresentaram os maiores valores em março de 2010 e o menor em outubro de 2009. Por outro lado, a menor média anual do Kc foi obtida pelo método de Priestley-Taylor, representando 78% daquele pelo método do BH; enquanto que o método do balanço de energia representou 86% dos valores encontrados pelo BH.

Tabela 3. Coeficiente de cultivo calculado pelos métodos do balanço de energia ( $K_{c_{BE}}$ ), Priestley & Taylor ( $K_{c_{PT}}$ ) e pelo método do balanço hídrico no solo ( $K_{c_{BH}}$ )

	$K_{c_{BE}}$	$K_{c_{PT}}$	$K_{c_{BH}}$
<b>Out/09</b>	0,34	0,34	0,28
<b>Nov/09</b>	0,69	0,60	0,41
<b>Dez/09</b>	0,96	0,64	0,94
<b>Jan/10</b>	0,91	0,72	1,03
<b>Fev/10</b>	0,95	0,87	1,11
<b>Mar/10</b>	1,16	1,07	1,29
<b>Abr/10</b>	1,03	1,02	1,24
<b>Mai/10</b>	0,83	0,81	1,15
<b>Jun/10</b>	0,92	0,92	1,30
<b>Jul/10</b>	0,86	0,84	1,20
<b>Ago/10</b>	0,87	0,76	1,07
<b>Média</b>	0,86	0,78	1,00

A comparação mais detalhada entre a evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) e evapotranspiração da cultura estimada pelos métodos do balanço de energia ET(BE), Priestley-Taylor ET(P-T), coeficiente de cultivo ET(Kc) e balanço hídrico do solo ET(BH) é exibida na Figura 2. Os quatro métodos apresentaram valores mínimos de evapotranspiração no início e final do ciclo da cultura e máximos no meio do ciclo justamente no período de maior demanda evapotranspiratória na região. Essa figura indica ainda que os valores da evapotranspiração obtidos pelos métodos ET(BE), ET(P-T), ET(Kc) e ET (BH) subestimam os valores da  $ET_0$  na maior parte do ciclo da cultura, principalmente no período de 1 a 27 do dia após o corte (DAC). Em alguns dias do ciclo da

cultura, observou-se que os valores de ET(Kc) e ET (BH) superestimaram os valores de  $ET_o$  enquanto os valores de ET(BE) e ET(P-T) continuaram a subestimar os valores da  $ET_o$ .

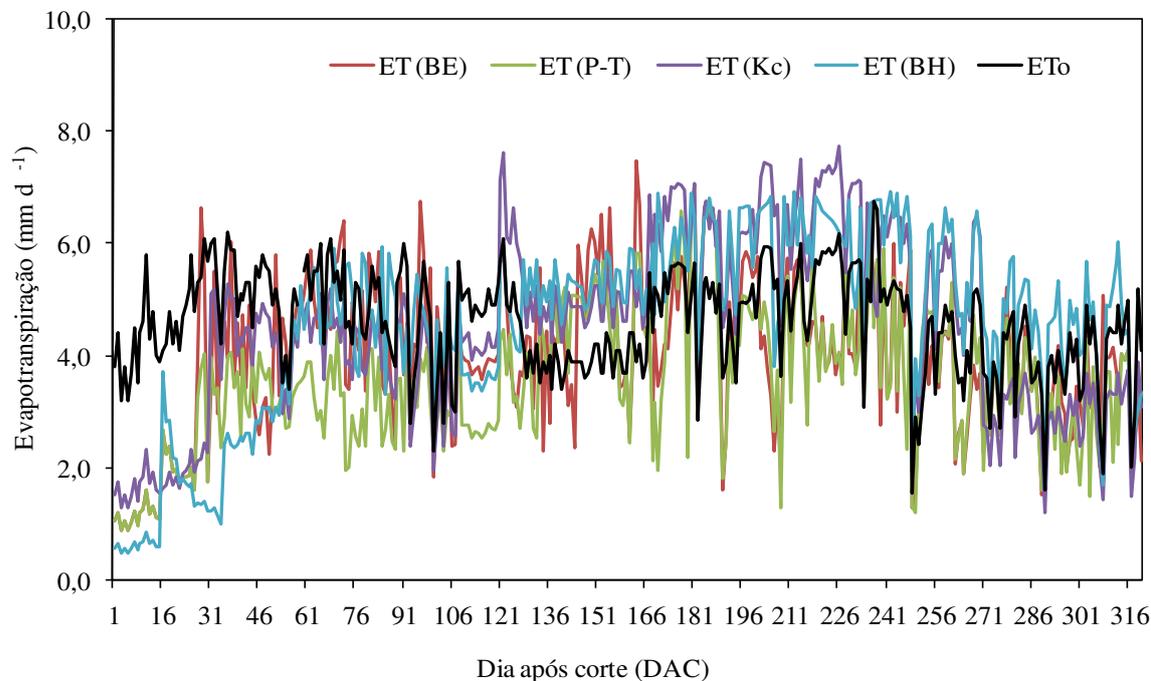


Figura 2. Comportamento temporal dos valores diários de  $ET_o$  estimados pelos métodos de Penman-Monteith FAO ( $ET_o$ ), balanço de energia ET (BE), Priestley-Taylor ET (PT), coeficiente de cultura ET (Kc) e do balanço hídrico ET (BH) em Capim, PB

A equação de regressão e o coeficiente de determinação entre a evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar obtidos pelos métodos do balanço hídrico no solo ( $ET_{BH}$ ) e o balanço de energia ( $ET_{BE}$ ) durante o período em estudo está apresentado na Figura 3. O coeficiente de determinação foi de 0,31, indicando o baixo nível de relacionamento entre os dois métodos na estimativa da evapotranspiração. A linha 1:1 indica que a maioria dos valores da  $ET_{BE}$  superestima a evapotranspiração pelo balanço hídrico do solo ( $ET_{BH}$ ). Estudos comparando métodos de estimativa da evapotranspiração de referência são mais comuns do que aqueles que comparam métodos de estimativa da evapotranspiração de culturas. Mendonça et al. (2003) realizaram a comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência na região do Norte Fluminense, RJ, e observaram que todos os métodos avaliados atendem satisfatoriamente a estimativa da  $ET_o$  na região do

Norte Fluminense do Estado do Rio de Janeiro, apresentando bons ajustamentos para períodos maiores que sete dias.

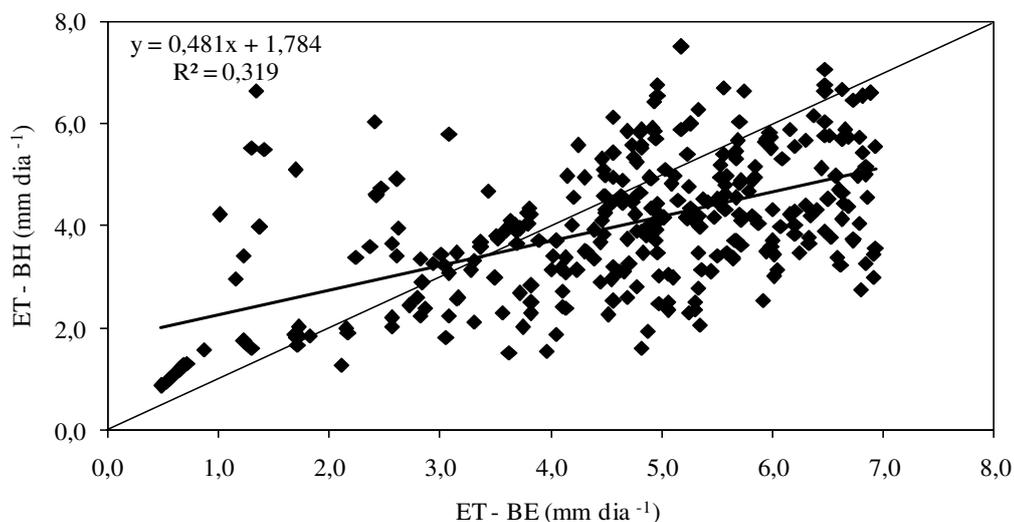


Figura 3. Comparação entre a evapotranspiração da cana-de-açúcar pelos métodos do balanço de energia (ET<sub>BE</sub>) e balanço hídrico no solo (ET<sub>BH</sub>)

A relação entre a evapotranspiração da cana-de-açúcar pelos métodos de Priestley-Taylor (ET<sub>PT</sub>) e ET<sub>BH</sub> é exibida na Figura 4. Essa relação é um pouco melhor do que no caso anterior, porém sem nenhuma significância estatística ao nível de 5% de probabilidade pelo teste t-Student. Neste caso, os dados de evapotranspiração pelo método de Priestley-Taylor superestimam praticamente todos os valores pelo método do BH.

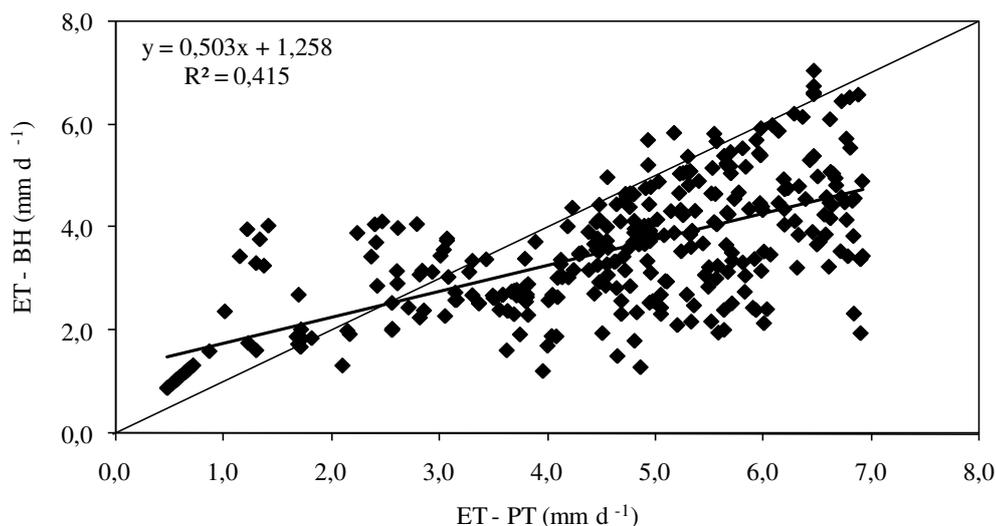


Figura 4. Comparação entre a evapotranspiração da cana-de-açúcar pelos métodos de Priestley-Taylor (ET<sub>PT</sub>) e balanço hídrico no solo (ET<sub>BH</sub>)

O coeficiente de determinação ( $r^2$ ) entre os valores da evapotranspiração da cana-de-açúcar pelos métodos do balanço hídrico e do coeficiente de cultivo ( $ET_{Kc} = K_c ET_o$ ) foi de 0,55 (Figura 5), que é estatisticamente significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste t-Student. Além disso, a relação 1:1 indica que aproximadamente a metade dos valores de  $ET_{Kc}$  superestima os valores da evapotranspiração pelo método  $ET_{BH}$ .

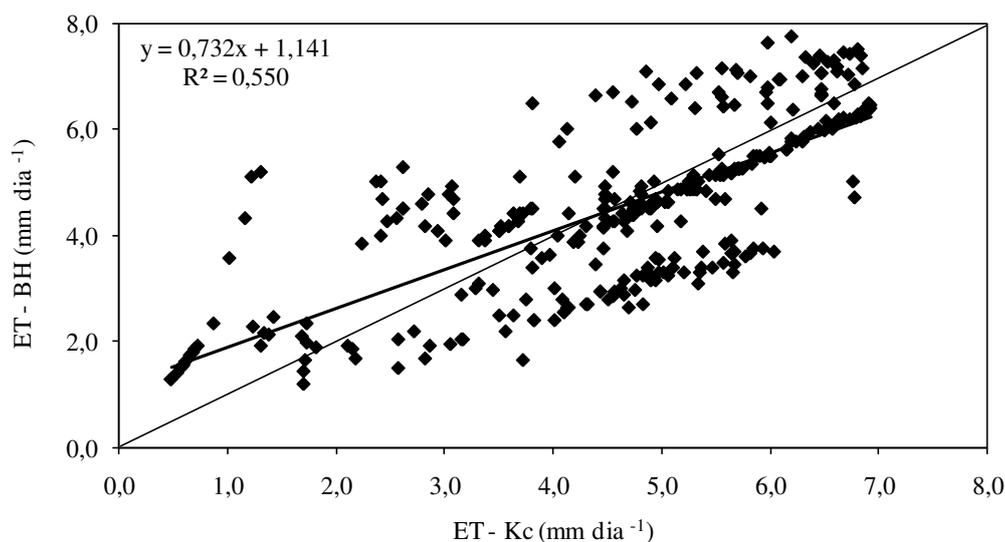


Figura 5. Comparação entre a evapotranspiração da cana-de-açúcar pelos métodos do coeficiente de cultivo ( $ET_{Kc}$ ) e balanço hídrico no solo ( $ET_{BH}$ )

Neste estudo, o coeficiente de Priestley & Taylor ( $\alpha$ ) foi calculado pelos métodos do balanço de energia  $\alpha(BE)$ , coeficiente de cultivo  $\alpha(Kc)$  e balanço hídrico do solo  $\alpha(BH)$  e apresentados os seus comportamentos temporais em função do dia após o corte (DAC) como apresentado na Figura 6.

Pode-se observar pouca dispersão entre os coeficientes  $\alpha$  no decorrer do período de estudo, sendo o coeficiente determinado pelo método do  $Kc$  o que apresentou maior dispersão (Figura 6B). Por outro lado, todos os coeficientes apresentaram comportamento semelhante durante o período em estudo, com mínimos no início e final do período e máximo na metade do ciclo da cultura.

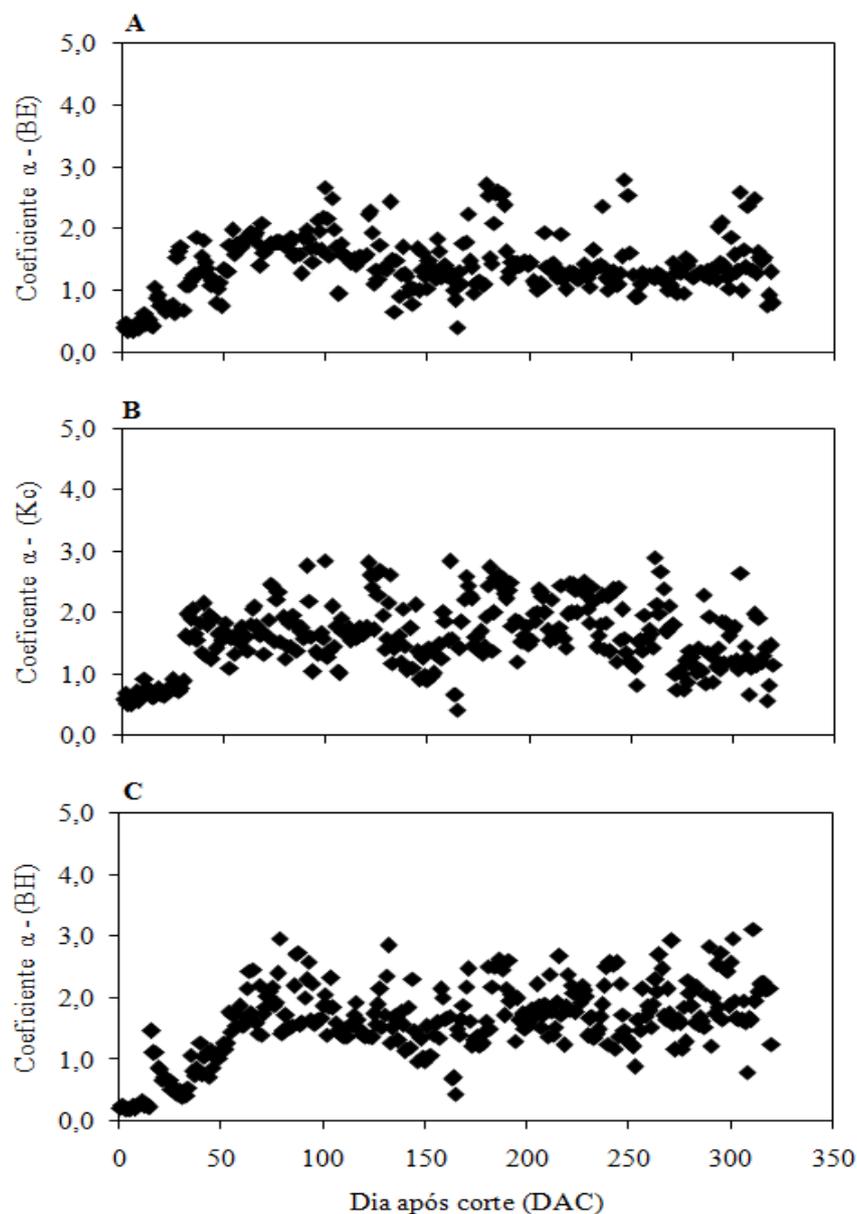


Figura 6. Comportamento temporal do coeficiente de Priestley & Taylor pelos métodos do balanço de energia [ $\alpha$ (BE)-A], coeficiente de cultivo [ $\alpha$ (Kc)-B] e balanço hídrico no solo [ $\alpha$ (BH)-C]

A equação de regressão e o coeficiente de determinação entre a evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar obtida pelos métodos do balanço de energia  $ET(BE)$  e o de Priestley-Taylor, com o valor do coeficiente determinado com base no balanço de energia  $ET(P-T)_{BE}$ , pode ser observado na Figura 7. Comprova-se que o coeficiente de determinação é significativamente alto entre  $ET(BE)$  e  $ET(P-T)_{BE}$ , com coeficiente de determinação de 0,940. A linha 1:1 indica que a maioria dos valores da  $ET(BE)$  superestima a evapotranspiração pelo método  $ET(P-T)_{BE}$ .

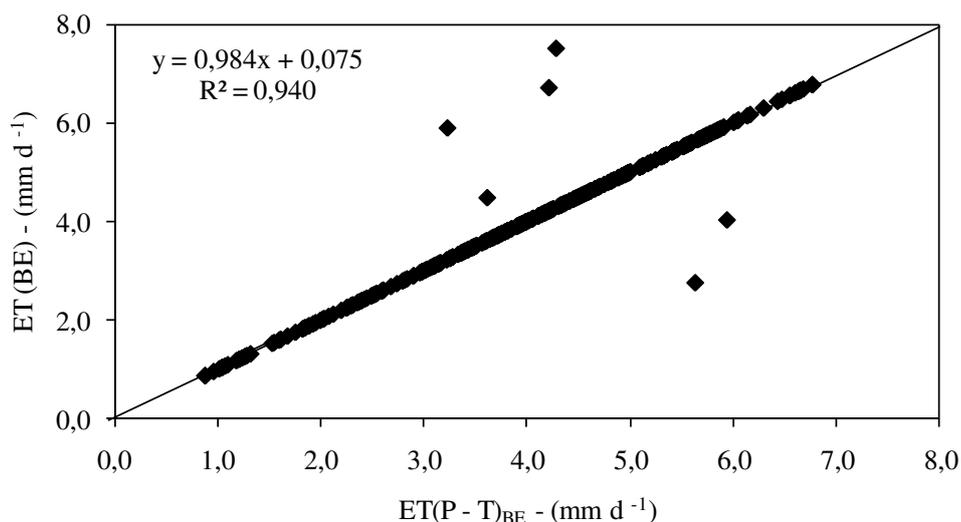


Figura 7. Comparação entre a evapotranspiração da cana-de-açúcar pelos métodos do balanço de energia ET(BE) e de Priestley-Taylor com coeficiente determinado com base no balanço de energia ET(P-T)<sub>BE</sub>

A comparação entre a evapotranspiração da cana-de-açúcar pelos métodos do coeficiente de cultivo e o método de Priestley-Taylor com coeficiente  $\alpha$  determinado com base no balanço de energia ET(P-T)<sub>BE</sub> é exibido na Figura 8. O coeficiente de determinação é igual a 0,985, indicando excelente relacionamento entre essas variáveis.

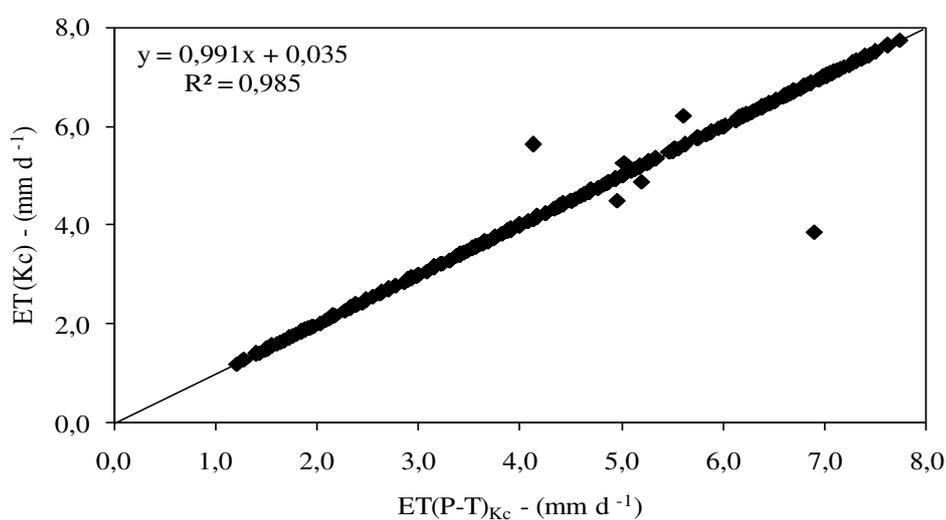


Figura 8. Comparação entre a evapotranspiração da cana-de-açúcar pelos métodos do coeficiente de cultivo ET(Kc) e o de Priestley-Taylor com o coeficiente determinado com base no coeficiente de cultivo ET(P-T)<sub>Kc</sub>

A comparação entre os valores da evapotranspiração da cana-de-açúcar pelos métodos do balanço hídrico ET(BH) e de Priestley-Taylor com coeficiente  $\alpha$  determinado com base no balanço hídrico ET(P-T)<sub>BH</sub> é exibido na Figura 9. A correlação entre ET(BH) e ET(P-T)<sub>BH</sub> resultou no coeficiente de determinação de 0,91 que é estatisticamente significativo ao nível de 5% pelo teste de t-Student. A relação 1:1 indica que a maior parte dos valores superestima os valores da evapotranspiração pelo método ET(P-T)<sub>BH</sub>.

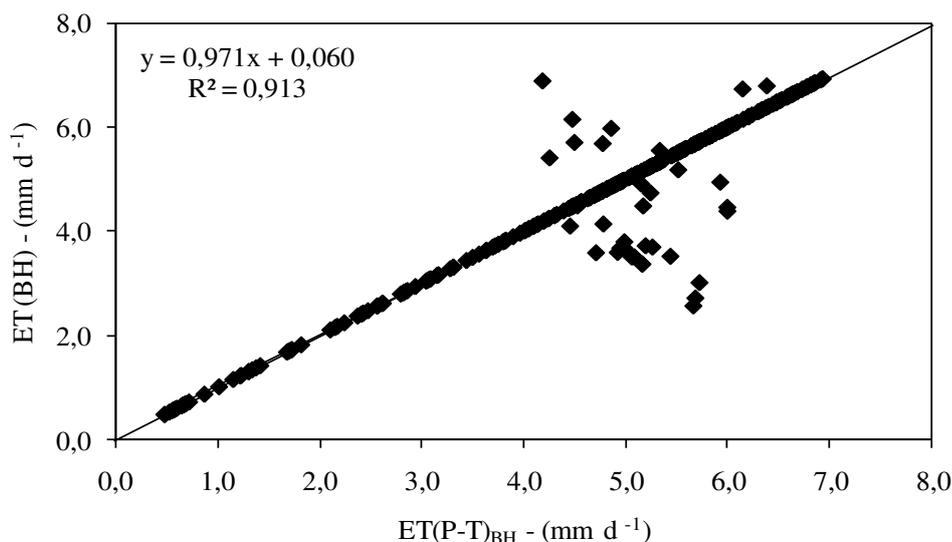


Figura 9. Comparação entre a evapotranspiração da cana-de-açúcar pelos métodos do balanço hídrico ET(BH) e de Priestley-Taylor com o coeficiente determinado com base no balanço hídrico ET(P-T)<sub>BH</sub>

Os valores do coeficiente alfa de Priestley-Taylor determinados através do método da razão de Bowen (BE), balanço hídrico (BH) e coeficiente de cultivo (Kc) em todos os estádios fenológicos da cultura é exibido na Tabela 4. Observa-se que todos os métodos apresentaram os menores valores no estágio inicial; já os maiores valores se apresentaram no estágio médio da cultura nos métodos do balanço de energia e do coeficiente de cultivo, sendo esse último o que apresentou o maior valor. Por outro lado, o método do balanço hídrico do solo mostrou o maior valor no estágio final, ao contrário dos métodos do balanço de energia e do coeficiente de cultivo que apresentaram máximos no estágio médio.

Os valores médios de  $\alpha$  foram significativamente maiores do que os valores comumente adotados por Priestley-Taylor. De acordo com Priestley-Taylor (1972),  $\alpha$  em solo nu varia entre 1,08 e 1,32 em vegetação densa emprega-se o valor de 1,26 em climas

úmidos. Esses valores foram adotados por Vourlitis et al. (2002) em floresta de transição Amazônia Cerrado. Por outro lado, Viswanadhama et al. (1991) comentam que em floresta tropical úmida os valores de  $\alpha$  variaram em função das condições de instabilidade e estabilidade da atmosfera nas horas do dia, variando de 0,67 a 1,16 e de 1,28 a 3,12, dependendo da época do ano.

Tabela 4. Estimativa do coeficiente de Priestley-Taylor pelos métodos do balanço de energia ( $\alpha_{BE}$ ), coeficiente de cultivo ( $\alpha_{Kc}$ ) e balanço hídrico do solo ( $\alpha_{BH}$ )

<b>Estádios</b>	<b><math>\alpha_{BE}</math></b>	<b><math>\alpha_{Kc}</math></b>	<b><math>\alpha_{BH}</math></b>
<b>Inicial</b>	0,7	0,7	0,5
<b>Desenvolvimento</b>	1,7	1,7	1,5
<b>Médio</b>	2,1	2,4	1,8
<b>Final</b>	1,5	1,5	2,1
<b>Média</b>	1,5	1,6	1,5

De acordo com a análise estatística, observou-se que tanto o método do balanço de energia quanto o de Priestley-Taylor apresentaram valores de erro médio dos desvios (EMD) negativos, sendo o de Priestley-Taylor o de menor valor (Tabela 5). Esses valores negativos indicam que esses métodos subestimam os valores da evapotranspiração pelo método do balanço hídrico; já o valor positivo mostra que o método do coeficiente de cultivo superestima tais valores. Por outro lado, a raiz quadrada do quadrado médio do erro normalizado (RQMDN) indica que os três métodos apresentaram valores positivos e próximos de zero.

Tabela 5. Análise estatística dos valores da evapotranspiração pelos métodos do balanço de energia ( $ET_{BE}$ ), Priestley-Taylor ( $ET_{PT}$ ) e coeficiente de cultivo ( $ET_{Kc}$ ) em relação ao método do balanço hídrico do solo.

	<b><math>ET_{BE}</math></b>	<b><math>ET_{PT}</math></b>	<b><math>ET_{Kc}</math></b>
<b>EMD</b>	-0,4	-0,8	0,16
<b>RQMDN</b>	0,1	0,2	0,04

## 5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos nesta pesquisa realizada na fazenda Capim II com a cultura de cana-de-açúcar, em Capim – PB permitem concluir o seguinte:

- O método de Priestley-Taylor apresentou valores muito próximos daqueles da evapotranspiração de referência;
- O coeficiente de Priestley-Taylor pelo método do balanço de energia é o mais apropriado para determinação da evapotranspiração da cultura de cana-de-açúcar nas condições de cultivo dos tabuleiros costeiros do Estado da Paraíba;
- O método de Priestley-Taylor com o coeficiente ajustado foi o que apresentou o melhor desempenho na estimativa da evapotranspiração da cana-de-açúcar quando comparado com as medições obtidas pelo método do balanço hídrico do solo.
- O coeficiente  $\alpha$  de Priestley-Taylor varia consideravelmente em função do estágio fenológico da cultura. Os valores de  $\alpha$  para a cultura da cana-de-açúcar foram significativamente maiores do que aqueles adotados por Priestley-Taylor, com valores médio de 1,5; 1,6 e 1,5, respectivamente, pelos métodos do balanço de energia, coeficiente de cultivo e do balanço hídrico do solo.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alfonsi, R. R.; Santos Filho, B. G.; Pedro Júnior, M. J.; Brunini, O.; Camargo, M. B. P. Balanço de energia em milho. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 21, n. 12, p. 1233-1235, dez. 1986.
- Alfonsi, R.R.; Pedro Júnior, M.J.; Brunini, O.; Barbieri, V. Condições climáticas para a cana-de-açúcar: Cana-de-açúcar: cultivo e utilização. In: PARANHOS, S.B. (Coord). Campinas, Fundação Cargill, 1987, v.1, p.42-55.
- Allen, G.; Pereira, L. S.; Raes, D.; Smith, M. Crop evapotranspiration. Rome: FAO, 1998. 297 p. (Irrigation and Drainage Paper, 56).
- Angelocci, L.R.; Villa Nova, N.A.; Marin, F.R.; Pereira, A.; Sentelhas, P.C. Estimativa da transpiração de lima ácida "Tahiti" por modelos climatológicos e comparação com o fluxo de seiva determinado pelo método do balanço de calor. Submetido à Reunión Argentina de Agrometeorologia, 8, Mendoza, 2000.
- Araújo, W. F.; Costa, S. A. A.; Santos, A. E. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) para Boa Vista, RR. Revista Caatinga, vol.20, nº4, p. 84-88, 2007.
- Alves, A. V., Azevedo, P. V.; Silva, B. B. Balanço de energia e reflectância de um cultivo de melão. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v.6, n.2, p.39-46, 1998.
- Ávila Netto, J.; Azevedo, P. V. De; Silva, B. B. Da; Soares, J. M.; Teixeira, A. H. De C. Balanço de energia sobre um cultivo de videira. In: Congresso Brasileiro De Agrometeorologia, 11.; Reunión Latino-Americana De Agrometeorologia, 2., 1999, Florianópolis. Anais... Florianópolis: Epagri, 1999. 1 CD-ROM.
- Azevedo, H. M. de. Resposta da cana-de-açúcar a níveis de irrigação e de adubação de cobertura nos tabuleiros da Paraíba. Campina Grande: UFCG, 2002. 112p. Tese Doutorado.
- Azevedo, P. V.; Silva, B. B.; Silva, V. P. R. Water requirements of irrigated mango orchards in Northeast Brazil. Agricultural Water Management, Amsterdam, v.58, n.1, p.241-254, 2003.
- Barbieri, V.; Villa Nova, N.A. Climatologia e a cana-de-açúcar. In: PLANALSUCAR. Coordenadoria Regional Sul. COSUL, Araras, 1977 p. 1-22.

- Bernardes, M. S. Fotossíntese no dossel das plantas cultivadas. In: Castro, P.R.C. *Ecofisiologia da produção agrícola*. Piracicaba: POTAFOS, 1987. p.13-48.
- Borges, A. C.; Mendiondo, E. M. Comparação entre equações empíricas para estimativa da evapotranspiração de referência na Bacia do Rio Jacupiranga. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.11, n.3, p.293-300, 2007.
- Borges, C. J. R.; Silva, V. P. R.; Campos, J. H. B. C.; Azevedo, P.V.; Moura, M. S. B.; Soares, J. M.; Silva, B.B. Influência do calor armazenado no sistema solo-planta no balanço de energia em pomar de mangueiras. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 12, p. 393-399, 2008.
- Bowen, I. S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. *Physical Review*, New York, v. 27, p. 779-787, 1926.
- Brito, A. S.; Libardi, P. L.; Ghiberto, P. J. Componentes do balanço de água no solo com cana-de-açúcar, com e sem adubação nitrogenada. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.33, p. 295-303, 2009.
- Campelo Júnior, J. H.; Determinação de evapotranspiração pelo método do balanço de energia; Análise de erros instrumentais. Dissertação de Mestrado. Piracicaba, ESALQ/USP SP. p. 1-79. 1978.
- Carvalho, C. M. de.; Azevedo, H. M. de.; Neto, J. D.; Silva, C. T. S. da.; Filho, R. R. G.; Júnior, M. V. Influência de diferentes níveis de irrigação sobre os parâmetros organográficos da cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, vol.4, nº 2, abr-jun, 2009, PP. 173-178.
- Castro, P. R. C.; Kluge, R. A. (Ed.). *Ecofisiologia de culturas extrativas. Cana-de-açúcar, seringueira, coqueiro, dendezeiro e oliveira*. Cosmópolis: Stoller do Brasil, 2001. 138p.
- Chang, J. *Climate and agriculture: an ecological survey*. Chicago: Aldine Publ., 1968. Cap. 13, p.129-143: Evapotranspiration.
- Chaves, J.B.P.; Silva, C.A.B. da; Silva, F.C. da; Cesar, M. A.A. Produção, Qualidade e Mercado de Açúcar Mascavo, Melado e Rapadura, no Brasil. In: Silva, F. C. da; Cesar, M. A. A.; Silva, C. A. B. da. (ed.). *Pequenas indústrias rurais de cana-de-açúcar: melado, rapadura e açúcar mascavo*. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2003. Cap. 1, p. 11-20.

- Cintra, F. L. D.; Libardi, P. L.; Saad, A. M. Balanço Hídrico no solo para porta-enxertos de citros em ecossistema de tabuleiro costeiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 4, n. 1, p.23-28, 2000.
- CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento – Disponível na web site: <http://www.conab.gov.br/>. Acesso em: 01/01/2013.
- Cunha, A. R. da. Parâmetros agrometeorológicos de cultura de pimentão (*Capsicum annum* L.) em ambientes protegido e campo. 2001. 128 f. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu.
- Cunha, G. R.; Bergamasch, H. Balanço de energia em alfafa. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v. 2, p. 9-16, 1994.
- Cunha, G. R.; Bergamaschi, H.; Berlato, M. A.; Matzenauer, R. Balanço de energia em cultivo de milho. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v. 4, n. 1, p. 1-14, 1996.
- Daniels, J.; Roach, B. T. Taxonomy and evolution. In: HEINZ, D. J. (Ed). *Sugarcane improvement through breeding*. Amsterdam: Elsevier, 1987. p. 7-84.
- Dantas Neto, J.; Figueredo, J. L. C.; Farias, C. H. A.; Azevedo, H. M.; Azevedo, C. A. V. Resposta da cana-de-açúcar, primeira soca, a níveis de irrigação e adubação de cobertura.
- Dias, F.L.F.; Mazza, J.A.; Matsuoka, S.; Perecin, D.; Maule, R.F. Produtividade da cana-de-açúcar em relação ao clima e solos da região noroeste do Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.23, n.3, p.627-634, 1999.
- Doorembos, J.; Kassam, A. H. Yield response to water. Rome, FAO, 1979, 193p. (Irrigation and Drainage Paper 33).
- Doorembos, J.; Kassam, A.H. Efeito da água no rendimento das culturas. Campina Grande :UFPB, 1994.306p. (FAO. Estudos de Irrigação e Drenagem, 33)
- EMBRAPA.- Centro Nacional de Pesquisa de Solo ( Rio de Janeiro). Sistema brasileiro de classificação do solo. Brasília:Embrapa Produção de Informação, 1999. 412p.
- Evelt, S. R.; Steiner, T. A.; Howell, and A. A. Durar. Water and Energy Balance of bare soil; Comparison of simulation models and Weighing Lysimeter data. *Agronomy Abstracts*, p. 15, 1992.

- Figueiredo, P.; Landell, M.G.A.; Campana, M.P. **Cana-de-açúcar**. (compact disc) 6. ed. Campinas: IAC, 1995. (IAC. Boletim 200).
- Fontana, D. C.; Berlatto, M. A.; Bergamaschi, H. Balanço de energia em soja irrigada e não irrigada. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 26, n. 3, p. 403-410, 1991.
- F. O. Lichts: Sugar & Ethanol: Disponível na web site: <http://ethanolbrazil.agraevents.com/>. Acesso em 17/12/2012.
- Hargreaves, G. H. Estimation of potential and crop evapotranspiration. *Transactions of the ASAE*, v.17, n.174, p.701-704, 1974.
- Hayashi, M. M. S.; Campelo Junior, J. H.; Priante Filho, Nicolau; Nogueira, José De Souza; Vourlitis, G. L. - Balanço de energia da *Crotalaria juncea* L. no período seco e no período úmido do ano, em condições de cerrado. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v.10, n.2, p.197-205, 2002.
- Heilman, J. L.; McInnes, K. J.; Savage, M. J. Soil and canopy energy in a west Texas vineyard. *Agricultural and Forest Meteorology*, Amsterdam, v.71, n.1, p.99-114, 1994.
- Hernandez, F.B.T. Manejo da irrigação por pivô central na cultura do milho. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 24. 1994, Viçosa - MG. *Anais...* Viçosa - MG: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1994. 13 p. (Artigo 286).
- Hillel, D. Solo e água: Fenômenos e princípios físicos. Porto Alegre: UFRGS, Departamento de Solos, 1970. 231p.
- Howell, T.A., Cuenca, R.H., Solomon, K.H. Crop yield response. In: HOFFMAN, G.J., HOWELL, T.A., SOLOMON, K.H. (Org.) *Management at farm irrigations systems*. St. Joseph: The American Society of Agricultural Engineers, 1990. p.93-122.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível na web site: <http://www.ibge.gov.br/home/>. Acesso em 06/12/2012.
- IDEME - Instituto de Desenvolvimento Municipal e Estadual da Paraíba. Disponível na web site: [www.ideme.pb.gov.br](http://www.ideme.pb.gov.br). Acesso em 01/01/2013.
- Inman-Bamber, N. G.; Muchow, R. C.; Robertson, M. J. Dry partitioning of sugarcane in Australia and South Africa. *Field Crops Research*, Amsterdam, v. 76, p. 71-84, 2002.

- Kang, S.; Zhang, B.; Li, F.; Zhang, L. Comparasion of three evapotranspiration models to Bowen ratio-energy balance method for a vineyard in an arid desert region of northwest China. *Agricultural Journal*. v. 148, p.1629-1640, 2008.
- Keating, B. A.; Robertson, M. J.; Muchow, R. C.; Huth, N. I. Modelling sugarcane production systems I: development and performace of the sugarcane module. *Field Crops Research*, Amsterdam, v.48, p.27-36, 1999.
- Leiva, E.; Barrantes, A. Incremento de la producion de caña de azucar com riego por goteo enterrado. *Sugar Y Azucar*, New York, v.93, n.8, p.26-31, 1998.
- Libardi, P. L.; Saad, A. M. Balanço hídrico em cultura de feijão irrigada por pivô central em Latossolo Roxo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 18, p. 529-532, set/dez. 1994.
- Libardi, P.L. Dinâmica da água no solo. Piracicaba, 1995. 497p.
- Machado, E.C. Fisiologia da produção de cana-de-açúcar. In: PARANHOS, S.B. (Coord.) *Cana-de-açúcar: Cultivo e Utilização*. Campinas: Fundação Cargill, 1987. V.1, p.57-87.
- Magalhães, A.C.N. Ecofisiologia da cana-de-açúcar: aspectos do metabolismo do carbono na planta. . In: Castro, P.R.C.; Ferreira, S.O.; Yamada, T.; (Coord.). *Ecofisiologia da produção*. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato (POTAFOS), 1987. p.113-118.
- Mathias, A.D.; Coates, W.E. Wine grape vine radiation balance and temperature modification with fine-mist nozzles. *Hort Science*, Alexandria, v.21, p.1453-1455, 1986.
- Matioli, C.S. Irrigação suplementar de cana-de-açúcar: modelo de análise de decisão para o Estado de São Paulo. Piracicaba, 1998. 122p. Tese (Doutorado) Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.
- Matsuoka, S.; Lavorenti, N.A.; Menezes, L.L.; Salibe, A.C.; Gheller, A.C.A.; ARIZONO, H. Novas variedades de cana -de-açúcar para a região Oeste do Estado de São Paulo. In: CONGRESSO NACIONAL DA STAB, 7., Londrina, 1999. Anais. Piracicaba: STAB, 1999. p.34-39.
- Matzenauer, R. *Evapotranspiração de plantas cultivadas e coeficientes de cultura*. In: Bergamaschi, H. (Coord.), *Agrometeorologia aplicada à irrigação*. Porto Alegre: Ed. da Universidade / UFRGS. 1992. Cap. 3, 1992, pp. 31-39.

- Matzenauer, R.; Maluf, J.R.J.; Bueno, A.C. Relações entre a evapotranspiração máxima do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) com a evapotranspiração de referência e com a radiação solar global. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v.7, n.2, p.173-178, 1999.
- Mendonça, E. A.; Dantas, R. T. Estimativa da evapotranspiração de referência no município de Capim, PB. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, n.2, p.196-202, 2010.
- Mendonça, J. C.; Sousa, E. F.; Bernardo, S.; Dias, G. P.; Grippa, S. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência na região do Norte Fluminense, RJ. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.7, n.2, p.275-279, 2003
- Moura, M.S.B. Consumo hídrico, produtividade e qualidade do fruto da goiabeira irrigada na região do Submédio São Francisco. Campina Grande: UFCG, 2005, 122 p. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) Curso de Doutorado em Recursos Naturais, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, 2005.
- Neto, J. D.; Figueredo, J. L. C.; Farias, C. H. A.; Azevedo, H. M.; Azevedo, C. A. V. Resposta da cana-de-açúcar, primeira soca, a níveis de irrigação e adubação de cobertura. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 10, n.2, p.283-288, 2006.
- Nobre, C. A.; Fisch, G.; Nobre. A. D.; Marques, A. O. - Balanço de energia, vapor d'água e CO<sub>2</sub> em áreas de floresta tropical na Amazônia central. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), relatório apresentado ao INPE e INPA; 14 f: 373 – 386, 1999.
- Oliver, H.R.; Sene, K.J. Energy and water balances of developing vines. *Agricultural and Forest Meteorology*, Amsterdam, v.61, p.167-185, 1992.
- Ometto, J.C. Uma equação para a estimativa de evapotranspiração potencial; sua aplicação no cálculo das necessidades hídricas e do rendimento agroindustrial da cana-de-açúcar na região de Piracicaba (SP). Piracicaba, 1974. 129p. Tese (Livre Docência) Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.
- Ometto, J.C. Parâmetros meteorológicos e a cultura da cana-de-açúcar. Piracicaba, 1980. 17p. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

- Ometto, J.C. Registros e estimativas de parâmetros meteorológicos da região de Piracicaba, SP. Piracicaba: Fealq. 76p. 1989.
- Prates, J. E.; Coelho, D. T.; Steinmetz, S. et al., Relação entre os componentes do balanço de energia em diferentes estágios de desenvolvimento do arroz (*Oryza sativa* L.) de sequeiro. In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, Belém-PA. *Sociedade Brasileira de Agrometeorologia*, 1987, p. 333-336.
- Penman, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and Grass. Proceedings of the Royal Society of London, v.A193, p.120-146, 1948.
- 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.; Villa Nova, N. A.; Sedyama, G.C. Evapo(tranpi)ração Piracicaba: FEALQ, 1997. 183p.
- Pereira, A. R.; Angelocci, L.R.; Sentelhas, P.C. Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas, Guaíba: Ed. Agropecuária, 2002. 478p.
- Priestley, C.H.B; Taylor, R.J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*, v.100, n.2, p.81-92, Fev. 1972.
- Procana: Centro de informações sucroenergéticas – Disponível na web site: <http://www.jornalcana.com.br/ProCana-Brasil/HOME>. Acesso em: 20/12/2012.
- Rojas, J.S.D.; Barbieri, V. modelo agrometeorológico de estimativa da produtividade da cana-de-açúcar. *Revista de Agrometeorologia*, v.7, n.1, p.67-73, 1999.
- Rosenberg, N. J.; Blad, B. L; Verma, S. B. Microclimate. The biological environment. 2<sup>o</sup> Edition, Lincoln, Nebraska: John Wiley & Sons, 1983, 495p.
- Scardua, R. O clima e a irrigação na produção agro-industrial da cana-de-açúcar (*Saccharum ssp*). Piracicaba: ESALQ/USP, 1985. 122p. Tese Livre Docência
- Scardua R.; Rosenfeld, U. Irrigação da cana-de-açúcar In: PARANHOS, S.B. (Coord.). Cana-de-açúcar: Cultivo e Utilização. Campinas: Fundação Cargill, 1987. v. I, p.373-431.
- Scarpari, M.S. Modelo para a previsão da produtividade da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) através de parâmetros climáticos. Piracicaba, 2002. 79p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

- Sellers, W. D. *Physical Climatology*. The University of Chicago Press, 1985, p. 227.
- Shuttleworth, W.J.; Calder, I.R. Has the Priestley-Taylor equation any relevance to forest evaporation? *Journal of Applied Meteorology*, v.18, p.639-646, May, 1979.
- Shuttleworth, W. J.; Gash, H. C., Lloyd, C. R., Moore, C. J., Roberts, J., Marques Filho, A. de O., Fisch, G., Silva Filho, V. De Paula, Ribeiro, M. De N. G., Molion, L. C. B., Sá, L. D. De Abreu, Nobre, J. C. A., Cabral, O. M. R., Patel, S. R., Moraes, J. C. Observations of radiation exchange above and below Amazonian forest. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 110, 1163-1169. 1984.
- Silva, V. P. R. Estimativa das necessidades hídricas da mangueira. Campina Grande: UFPB, 2000, 129p. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Curso de Doutorado em Recursos Naturais, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, 2000.
- Silva, V. de P. R. On climate variability in Northeast of Brazil. *Journal of Arid Environments*, v.1, n.58, p.575-596, 2004.
- Silva, V. de P. R.; Belo Filho, A. F.; Silva, B. B. da; Campos, J. H. B. C. Desenvolvimento de um sistema de estimativa da evapotranspiração de referência. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.9, n.4, p.547-553, 2005.
- Silva, V. P. R.; Azevedo, P. V.; Silva, B. B. Surface Energy Fluxes and Evapotranspiration of a Mango Orchard Grown in a Semiarid Environment. *Agronomy Journal*, v. 99, p. 1391-1396, 2007.
- Silva, V. P. R.; Silva, R. A.; Cavalcanti, E. P.; Braga, C. C.; Azevedo, P. V.; Singh, V. P.; Pereira, E. R. R. Trends in solar radiation in NCEP/NCAR database and measurements in northeastern Brazil. *Solar Energy*, v. 84, p. 1852-1862, 2010.
- Silva, A. B.; Neto, J. D.; Farias, C. H. A.; Azevedo, C. A. V.. Rendimento e qualidade da cana-de-açúcar irrigada sob adubações de nitrogênio e potássio em cobertura. *Revista Caatinga*. v.22, n.3, p.236-241, 2009.
- Silva, B. K. N.; Silva, V. P. R.; Azevedo, P.V.; Farias, C. H. A.. Análise de sensibilidade dos métodos de estimativa da evapotranspiração de referência e razão de Bowen em cultura da cana-de-açúcar. *Revista Brasileira Engenharia Agrícola Ambiental, Campina Grande*, v.15 n.10, 2011.

- SINDALCOOL - Sindicato da Indústria do Alcool e do Açúcar da Paraíba. Disponível na web site: <http://www.sindalcool.com.br/>.
- Sousa, E. F.; Bernado, S.; Carvalho, J. A. Função de produção da cana-de-açúcar em relação à água para três variedades em Campos dos Goytacazes. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.19, n.1, p.28-12, 1999.
- Sousa, I. F. Manejo de irrigação, consumo hídrico e produtividade do coqueiro anão verde nos Tabuleiros Costeiros Norte do Estado de Sergipe. Campina Grande: UFCG, 2005, 143 p. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) Curso de Doutorado em Recursos Naturais, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, 2005.
- Souza, E. F.; Bernardo, S.; Carvalho, J. A. (1999). Função de produção da cana-de-açúcar em relação à água para três variedades em Campos dos Goytacazes. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.19, n.1, p.28-12.
- Souza, C. B.; Silva, B. B. da; Azevedo, P. V. de; Silva, V. P. R. Fluxos de energia e desenvolvimento da cultura do abacaxizeiro. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.12, p. 400-407, 2008.
- Stone, P. J.; Sorensen, I. B.; Jamieson, P. D. Effect of soil temperature on phenology, canopy development, biomass and yield of maize in a cool-temperature climate. Field Crops Research, Amsterdam, v. 48, p. 169-178, 1999.
- Sumner, D. M.; Jacobs, J. M. Utility of Penman–Monteith, Priestley–Taylor, reference evapotranspiration, and pan evaporation methods to estimate pasture evapotranspiration, Journal of Hydrology, v. 308, p. 81-104, 2005.
- Tanner, C.B. Energy approach to evapotranspiration from crops. Soil Science of America Proceedings, Madison, v, 24, p, 1-9, 1960.
- Teixeira, A.H. De; Azevedo, P.V. De; Silva, B.B. Da; Soares, J. M. Balanço de energia na cultura da videira, cv. Itália. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v. 5, p. 137-141, 1997.
- Thompson,G.D. Water use by sugarcane. The South African Sugar Journal, v.60, p.593-600; p.627-635, 1976.
- Thornthwaite, C. W. An approach toward a rational classification of climate. Geographical Review, v.38, p.55-94, 1948.

- Timm, L.C.; Oliveira, J.C.M.; Tominaga, T.T.; Cássaro, F.A.M.; Reichardt, K. & Bacchi, O.O.S. Water balance of a sugarcane crop: Quantitative and qualitative aspects of its measurement. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental*, v.6, p.57-62, 2002.
- Trambouze, W.; Bertuzzi, P.; Voltz, M. Comparison of methods for estimating actual vapotranspiration in a row-cropped vineyard. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 91, p. 193-208, 1998.
- UNICA - União da Agroindústria Canavieira do Estado de São Paulo. <http://www.mzweb.com.br/biosev/web/>. 29 de jun de 2012.
- USDA - United States Department of Agriculture. Disponível na web site: <http://www.usda.gov/wps/portal/usda/usdahome>. Acesso em 01/02/2013.
- Unland, H. E.; Houser, P. R.; Shuttleworth, W. J.; Yang, Z. L. Surface flux measurements and modelling at a semi-arid sonoran desert site. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.82, n.1, p.119-153, 1996.
- Villa Nova, N. A. Estudos sobre o balanço de energia em cultura de arroz. Piracicaba: USP, 1973. 89 f. Tese (Livre Docência). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo.
- Viswanadham, Y.; Silva Filho, V.P.; André, R.G.B. The Priestley-Taylor parameter a for the Amazon forest. *Forest Ecology Management Journal*, v.38, p.211-225, 1991.
- Vourlitis, G. L.; Priante-Filho, N.; Hayashi, M. M. S.; Nogueira, J. S. De; Caseiro, F.; Campelo-Junior J. H. Seasonal variations in the evapotranspiration of a transitional tropical forest of Mato Grosso, Brazil, *Water Resources Research*, v. 38, n. 6, p. 1094.
- Xiaoying, L.; Erda, L. Performance of the Priestley–Taylor equation in the semiarid climate of North China. *Agricultural Water Management*, v. 71, p. 1-17, 2005.
- Xu, C. Y.; Singh, V. P. Evolution and generalization of radiation-based methods for calculating evaporation. *Hydrology, Processes*, v.14, 339-349. 2000.
- Wiedenfeld, R. P. Water stress during different sugarcane growth periods on yield and response to N fertilizer. *Agricultural Water Management*, v.43 p.173–182, 2000.
- Wright, J. L. New evapotranspiration crop coefficient. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, v.108, n.2, p.57-74, 1982.

Wutke, E.B.; Arruda, F.B.; Fancelli, A.L.; Pereira, J.C.V.N.A.; Sakai, E.; Fujiwara, M.; Ambrosano, G.M.B. Propriedades do solo e sistema radicular do feijoeiro irrigado em rotação de culturas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.24, n.3, p.621-33, 2000.