

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**

# **METEOROLOGIA**



**Tese de Doutorado**

**CICERA JOSEFA ROZANGELA BORGES**

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO E COEFICIENTES DE CULTIVOS SIMPLES E  
DUAL DA CANA-DE AÇÚCAR CULTIVADA EM CONDIÇÕES TROPICAIS**

**Campina Grande, Agosto de 2011**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE – UFCG**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS – CTRN**  
**UNIDADE DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS- UACA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA-**  
**PPGMET**  
**CURSO DE DOUTORADO EM METEOROLOGIA**



**EVAPOTRANSPIRAÇÃO E COEFICIENTES DE CULTIVOS SIMPLES E DUAL**  
**DA CANA-DE AÇÚCAR CULTIVADA EM CONDIÇÕES TROPICAIS**

**CICERA JOSEFA ROZANGELA BORGES**

**CAMPINA GRANDE – PB**

**Agosto de 2011**

CICERA JOSEFA ROZANGELA BORGES

EVAPOTRANSPIRAÇÃO E COEFICIENTES DE CULTIVOS SIMPLES E DUAL  
DA CANA-DE AÇÚCAR CULTIVADA EM CONDIÇÕES TROPICAIS

TESE apresentada ao programa de  
Pós-graduação em Meteorologia da  
Universidade Federal de Campina  
Grande, em cumprimento às  
exigências para obtenção do título  
de Doutor em Meteorologia.

Área de Concentração: **Agrometeorologia**

**ORIENTADORES:**

Dr. Vicente de Paulo Rodrigues da Silva

Dr. Carlos Henrique de Azevedo Farias

CAMPINA GRANDE - PB

Agosto de 2011

CICERA JOSEFA ROZANGELA BORGES

EVAPOTRANSPIRAÇÃO E COEFICIENTES DE CULTIVOS SIMPLES  
E DUAL DA CANA-DE AÇÚCAR CULTIVADA EM CONDIÇÕES  
TROPICAIS

TESE APROVADA EM 26/08/2011

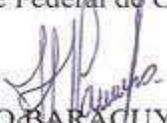
BANCA EXAMINADORA

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

  
Dr. CARLOS HENRIQUE DE AZEVEDO FARIAS  
Engenheiro Agrônomo, D.Sc. em Recursos Naturais  
Destilaria Mirim S/A.

  
Profa. Dra. CÉLIA CAMPOS BRAGA  
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

  
Prof. Dr. INAJÁ FRANCISCO DE SOUSA  
Departamento Engenharia Agrônômica  
Universidade Federal de Sergipe

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFG

B732e     Borges, Cícera Josefa Rosangela.  
            Evapotranspiração e coeficientes de cultivos simples e dual da  
cana-de-açúcar cultivada em condições tropicais / Cícera Josefa Rosangela  
Borges. - Campina Grande, 2011.

            Tese (Doutorado em Meteorologia) – Universidade Federal  
de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.

            Orientadores: Prof. Dr. Vicente de Paulo Rodrigues da Silva e Prof. Dr.  
Carlos Henrique de Azevedo Farias.

            Referências.

            1. Meteorologia. 2. Balanço Hídrico no Solo. 3. Necessidades Hídricas.  
4. Umidade do Solo. I. Título.

CDU 551.5 (043)

Com todo amor e carinho, às  
pessoas mais importantes da  
minha vida: meus pais Geraldo  
Duarte Borges e Corina Adilza  
da Silva Borges, DEDICO

Aos meus irmãos José Geová,  
Jorge, Sueli, Geovane,  
Geraldinho e Júlio César. Aos  
meus sobrinhos e sobrinhas,  
OFEREÇO

## AGRADECIMENTOS

A Deus pai todo poderoso por sua onipresença em toda minha vida, e por tudo que fez e fará nela.

Aos nossos familiares e incentivadores, obrigada por compreender a nossa ausência, encorajando-nos nas horas difíceis.

Ao professor Vicente de Paulo Rodrigues da Silva, pela orientação e ensinamentos transmitidos; exemplo de conduta profissional, confiança, incentivo.

A Carlos Henrique pela orientação e apoio prestado durante a pesquisa.

Ao professor, Pedro Vieira de Azevedo pela colaboração e sugestões apresentadas.

A Dra Magna Soelma Beserra de Moura, por toda assistência prestada e conhecimentos transmitidos.

Aos colegas e funcionários da Miriri: Antônio Emídio, Gutemberg e Marquinho pelo apoio prestado durante o experimento e por sua amizade. E a todos que me auxiliaram de alguma forma durante o experimento, seja no transporte, empréstimo de instrumentos elétricos e até mesmo atendendo uma ligação telefônica.

A Miriri na pessoa do Dr. Gilvan Celso Cavalcanti de Moraes Sobrinho, Diretor-Superintendente da Miriri Alimentos e Bioenergia S/A, pelo apoio a pesquisa.

Ao Gerente Agrícola, Gabriel Saturnino de Oliveira, pela ajuda na execução deste trabalho.

Aos meus companheiros de convivência pela agradável companhia durante esse período: Magda, Fernando, Jane, Natália, Ismênia, Raquel e Dona Graciete.

Aos amigos do curso que muito me ajudaram durante esse trajeto: Taciana, Márcia e Soetania companheiras de disciplinas e amigas, a Madson pela ajuda solicitada, agradeço em especial a Walker, companheiro de experimento, obrigada por todo o apoio prestado.

Aos professores, do programa por todo conhecimento transmitido durante o curso.

A Divanete pelo exemplo de competência, profissionalismo e atenção apresentada durante o curso.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq) pelo suporte financeiro (CNPq-CTHIDRO).

À Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, pela oportunidade de realizar este curso.

A todos que de alguma forma contribuíram de forma direta ou indireta para realização deste trabalho.

## SUMÁRIO

RESUMO	x
ABSTRACT	xi
LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE TABELAS	xiv
1. INTRODUÇÃO	16
1.1. Objetivo Geral	17
1.1.1 Objetivos Específicos	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1. A cultura da de cana-de-açúcar	19
2.2. Consumo hídrico de culturas	22
2.3. Balanço hídrico no solo	24
2.4. Coeficiente de cultivo dual	31
3. MATERIAL E MÉTODOS	40
3.1. Descrição da área de estudo	40
3.2. Tratos culturais e dados experimentais	41
3.3. Método	41
3.3.1 Coeficiente de cultivo simples	41
3.4. Coeficiente de cultura dual	41
3.4.1. Coeficiente basal da cultura	42
3.4.2. Coeficiente de evaporação de água no solo	43
3.4.3. Evapotranspiração em condições de estresse de água	46
3.4.4. Total de água disponível (TAW)	47
3.4.5. Água facilmente disponível (RAW)	47
3.4.6. Balanço de água na zona radicular	48

3.5. Medições da evapotranspiração da cultura	49
3.6. Dados para o balanço hídrico no solo	50
3.7. Evapotranspiração de referência	51
3.8. Área foliar e índice de área foliar	52
3.9. Análise estatística	53
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
5. CONCLUSÕES	70
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71
7. ANEXOS	79

## **Evapotranspiração e coeficientes de cultivos simples e dual da cana-de-açúcar cultivada em climas tropicais**

**Resumo:** O experimento de campo desta pesquisa foi realizado na Destilaria Miriri S/A, no Estado da Paraíba, durante o ciclo produtivo da cultura da cana-de-açúcar irrigada por pivô central (aspersão), variedade RB 92 579, no período de 10 de outubro de 2009 a 10 setembro de 2010. O objetivo do trabalho foi determinar a evapotranspiração e os coeficientes de cultivos simples e dual da cana-de-açúcar cultivada para climas tropicais. Os coeficientes de cultivos simples e dual foram obtidos de acordo com a nomenclatura da FAO-56. A evapotranspiração da cultura foi obtido pelo método do balanço hídrico no solo e a evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith, utilizando dados de temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento e radiação solar coletados na Plataforma de Coleta de Dados próxima da área experimental. A umidade do solo foi monitorada com sondas TDR (Frequency Domain Reflectometry), modelo PR2/6, Delta-T. A análise de erros foi realizada com base no erro médio dos desvios (EDM) e a raiz quadrada do quadrado médio do erro normalizado (RQMDN), dos dados medidos e estimados da evapotranspiração da cultura. Os resultados obtidos permitiram constatar que os valores do coeficiente de cultivo propostos pela FAO para a cultura da cana-de-açúcar não são apropriados para regiões tropicais e, também, que a metodologia do  $K_c$ -dual pode ser utilizada com melhor precisão na estimativa das necessidades hídricas da cultura da cana-de-açúcar em regiões tropicais.

**Palavras chave:** Balanço hídrico no solo, necessidades hídricas, umidade do solo, irrigação, equação de Penman-Monteith.

## **Evapotranspiration and single and dual crop coefficients for sugar cane grown in tropical environment**

**Abstract:** The field experiment was carried out in Distillery Miriri S/A, located in Paraíba State, during the productive cycle of sugar cane crop irrigated by central pivot irrigation (sprinkler), variety RB 92 579, in the period from October 10, 2009 to September 10, 2010. The objective of this study was to determine the evapotranspiration and single and dual crop coefficients for sugar cane grown in tropical environments. The single and dual coefficients were obtained following FAO-nomenclature. The crop evapotranspiration was obtained based on soil water balance and reference evapotranspiration by Penman-Monteith method (FAO/56), using the data of air temperature, relative humidity, wind speed and solar radiation from Data Collection Platform, next to the experimental site. Soil water moisture was monitored by TDR probes (Frequency Domain Reflectometry), Model PR2/6, Delta-T. The error analysis was based on mean bias difference (MBD) and the normalized root mean square difference (NRMSD), using both measured and estimated data of crop evapotranspiration. The results showed that the crop coefficients values proposed by the FAO for sugar cane are not suitable for tropical regions as well as dual crop coefficient approach can provide accurate estimates of water requirements for sugar cane growth in tropical environment.

**Keywords:** Water balance, water requirement, soil water content, Penman-Monteith approach.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Localização da Fazenda Capim II, com destaque da área de estudo	40
Figura 2.	Distribuição temporal do coeficiente de cultivo basal ( $K_{cb}$ ), coeficiente de evaporação de água do solo ( $K_e$ ) e coeficiente dual ( $K_c - \text{dual}$ ) da cana-de-açúcar cultivada em região tropical	55
Figura 3.	Coeficiente de cultivo simples ajustado às condições climáticas da região ( $K_c - \text{simples}$ ) e o coeficiente de cultivo com base no balanço hídrico no solo ( $K_c - \text{BH}$ ) da cana-de-açúcar	60
Figura 4.	Média semanal da evapotranspiração da cana-de-açúcar obtida com base no balanço hídrico no solo e os valores da precipitação + irrigação na parcela experimental	61
Figura 5.	Relacionamento entre evapotranspiração obtida pelo balanço hídrico no solo e o índice de área foliar (IAF) da cana-de-açúcar. O índice de área foliar foi obtido a partir de modelo estabelecido por Gouveia Neto (2009) para o tratamento 100% da $ET_0$ para a cultura cultivada na mesma região desta pesquisa	62
Figura 6.	Curso sazonal da umidade do solo (losangos) e da drenagem de água no solo (barras verticais) durante o período experimental com a cana-de-açúcar	63
Figura 7.	Variação sazonal da evapotranspiração e seus respectivos desvios padrão da cana-de-açúcar obtido com base no coeficiente de cultivo simples ( $K_c - \text{simples}$ ), no balanço hídrico	66

no solo ( $K_c - BH$ ) e no dual ( $K_c - dual$ ), para média de 7 dias

Figura 8. Curso sazonal da evapotranspiração obtida com base no balanço hídrico no solo (losangos) e coeficiente de cultivo ajustado (linha espessa) da cana-de-açúcar às condições climáticas tropicais 67

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Duração dos estádios fenológicos da cana-de-açúcar cultivada em latitudes tropicais e os valores dos coeficientes de cultivos simples ( $K_c$ ) e basal ( $K_{cb}$ )	43
Tabela 2.	Parâmetros usados na determinação do coeficiente de evaporação de água no solo ( $K_e$ ), coeficiente de estresse hídrico ( $K_s$ ) e da drenagem do solo ( $D$ )	54
Tabela 3.	Componentes do balanço hídrico no solo durante as fases do ciclo da cultura da cana-de-açúcar em milímetros	57
Tabela 4.	Valores médios dos coeficientes de cultivo ajustados às condições climáticas da região durante as fases do ciclo da cultura da cana-de-açúcar e IAF = índice de área foliar	58
Tabela 5.	Valores médios ( $\text{mm d}^{-1}$ ) e acumulados (mm) da evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar com base no coeficiente de cultivo simples ajustado às condições climáticas da região ET ( $K_c$ – simples), coeficiente de cultivo obtido com base no balanço hídrico no solo ET ( $K_c$ - BH) e no coeficiente de cultivo dual ET ( $K_c$ - dual)	64
Tabela 6.	Sumário das estatísticas da evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar com base no coeficiente de cultivo simples ajustado às condições climáticas da região ET ( $K_c$ – simples) e o coeficiente de cultivo dual ET ( $K_c$ - dual) comparadas com a evapotranspiração obtida com base no balanço hídrico no solo ET ( $K_c$ - BH). EMD	68

(mm d<sup>-1</sup>) = erro médio dos desvios, RQMDN (%) = raiz quadrada do quadrado médio do erro normalizado e r = coeficiente de correlação

## 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 mercado sucroalcooleiro movimenta cerca de R\$ 12,7 bilhões por ano, com faturamentos diretos e indiretos que correspondem a 2,3% do Produto Interno Bruto brasileiro (PIB).

A produção de cana-de-açúcar no Brasil em 2006 cresceu 8,1%, em relação ao ano seguinte, apresentando crescimento constante alcançando 719.156.742 t (IBGE, 2010). Nesse sentido, a estimativa precisa do consumo hídrico dessa cultura se torna uma tarefa cada vez mais importante no sentido de se obter a máxima produtividade com menos investimentos no seu manejo.

O conhecimento de como a planta utiliza a água no solo, e como ela responde aos níveis de armazenagem a partir do balanço hídrico pode ser uma saída viável para o estabelecimento de estratégias eficazes de manejo visando o melhor uso possível das reservas de água no solo pelas culturas. Entretanto, o manejo de água adotado para diversas culturas no mundo se baseia em valores adaptados do coeficiente de cultura ( $K_c$ ) propostos pelo FAO 56 .

O planejamento de irrigação baseado em valores empíricos do  $K_c$  refletem nos custos de produção, na qualidade do produto e no rendimento. Por outro lado, o excesso d'água aplicado às culturas pode provocar salinização do solo e contaminação do lençol freático. Esses coeficientes têm sido aceitos e utilizados em várias partes do mundo. Entretanto, eles podem não ser totalmente precisos; portanto há a necessidade de calibrá-los de acordo com a espécie, solo e condições climáticas (Allen et al., 1998). Neste sentido, muitos estudos têm sido conduzidos para se obter coeficientes de cultivos

mais apropriados de acordo com as condições locais, utilizando diferentes técnicas, tais como lisímetro (Liu et al., 2002; Kang et al., 2003; Karam et al., 2006; Lopez-Urrea et al., 2009; Liu & Luo, 2010), método do balanço de energia (Azevedo et al., 2007; Campos et al., 2008; Souza et al., 2008, Borges et al., 2008) e o método do balanço hídrico no solo (Silva et al., 2001; Souza et al., 2006; Campos et al., 2007).

Novas metodologias estão sendo desenvolvidas para se estimar o consumo de água pelas culturas, com vistas no incremento da eficiência do uso da água. Neste particular, o coeficiente dual de cultivo, apresentado inicialmente por Allen, (2000), tem sido amplamente utilizado por vários pesquisadores (Allen et al. 2005; López-Urrea et al., 2009; Liu & Luo, 2010 e Flumignan et al., 2011).

Dessa forma, é razoável inferir que o balanço hídrico no solo seja uma técnica apropriada para se obter a evapotranspiração da cana-de-açúcar; além disso, o  $K_c$  proposto pela FAO 56 para essa cultura pode não ser o mais apropriado para a região tropicais e, em particular, para os tabuleiros costeiros do Estado da Paraíba. Além disso, estudos de  $K_c$  dual realizados em condições edafoclimáticas brasileiras são escassos, embora importantes para possibilitar uma avaliação sobre a precisão do uso de  $K_c$  simples, possibilitando, assim, condições para ajustá-los para culturas específicas. Portanto, levando em consideração que existem poucos estudos sobre as necessidades hídricas da cana-de-açúcar em face da complexidade envolvida no cálculo da evapotranspiração da cultura através de métodos apropriados, bem como pela exigência de dados meteorológicos e de solo em escala diária durante o ciclo da cultura, este trabalho tem os seguintes objetivos:

**Geral:** determinar a evapotranspiração e os coeficientes de cultivos simples e dual da cana-de-açúcar cultivada em ambientes tropicais, com vistas à utilização apropriada dos recursos hídricos da região e o aumento da produtividade da cultura.

**Específicos:** (i) comparar os valores dos coeficientes de cultura obtidos pelo método da FAO 56 com aqueles determinados com base no método do balanço hídrico no solo para avaliar o seu desempenho com a cultura de cana-de-açúcar nas bases diárias e sazonais; (ii) determinar os coeficientes de cultivos basal e de evaporação de água no solo, com vistas a obtenção do coeficiente de cultivo dual da cana-de-açúcar; (iii) determinar o relacionamento entre a componente da transpiração do coeficiente de cultura dual com o índice de área foliar da cultura, (iv) avaliar o nível de erro na obtenção das necessidades hídricas da cana-de-açúcar com base nos coeficientes simples e dual (metodologia FAO) com medições em campo da evapotranspiração da cultura e (v) construir a curva de coeficiente de cultivo da cana-de-açúcar para regiões tropicais.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. A cultura da cana-de-açúcar

A crescente demanda por álcool no mercado interno e externo influenciou o preço do produto, com um crescimento de R\$ 3,8 bilhões no valor da produção, que atingiu quase R\$ 17 bilhões em 2006. Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2007), a área plantada com cana-de-açúcar vem crescendo nos últimos anos, ultrapassando 6,0 milhões de hectares em 2006. Os principais produtos gerados por essa cultura são o açúcar, com aproximadamente 30,04 milhões de toneladas, e o álcool, com 21,30 bilhões de litros (Oliveira et al., 2007).

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar no mundo, com 8,36 milhões de hectares de área cultivada e uma produção de 5,58 milhões toneladas de colmos, 26,6 milhões de metros cúbicos de álcool e 30,0 milhões de toneladas de açúcar (EPE, 2008). O balanço energético nacional elaborado pela EPE (Empresa de Pesquisa Energética) também destaca que o rendimento médio nacional de cana-de-açúcar é de 76,61 toneladas de colmos por hectare. O bagaço da cana-de-açúcar é utilizado como fonte térmica para a produção de álcool (inclusive para a geração de energia elétrica) e de alimentos (na produção de açúcar). A produção agrícola de cana-de-açúcar tem desempenho importante na matriz energética brasileira (EPE, 2008), pois gera cerca de 1,2 milhões de postos de emprego em toda a cadeia produtiva, ou seja, 600 vezes mais do que aqueles gerados pelo setor do petróleo. Os dados do IBGE (2007) demonstram que os maiores produtores brasileiros de cana-de-açúcar são os seguintes estados da Federação: Mato Grosso (96,5 t ha<sup>-1</sup>), Goiás (73,4 t ha<sup>-1</sup>), São Paulo (72,9 t ha<sup>-1</sup>), Paraná

(73,4 t ha<sup>-1</sup>), Minas Gerais (56,9 t ha<sup>-1</sup>), Alagoas (55,7 t ha<sup>-1</sup>), Pernambuco (43,3 t ha<sup>-1</sup>) e Paraíba (41,2 t ha<sup>-1</sup>).

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 a principal matéria-prima para a fabricação do açúcar e álcool (etanol). Essa cultura é cultivada, principalmente, em clima tropical onde se alternam as estações secas e úmidas.

Uma precipitação pluvial média anual superior a 1.000 mm, sendo bem distribuída, é suficiente para a obtenção de altas produções de cana-de-açúcar. 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). Farias (2006) realizou uma pesquisa na Fazenda Capim II, localizada no Município de Capim/PB com objetivo de se avaliar a cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*), variedade SP 79 1011, submetida às variações de lâminas de irrigação e níveis de adubação com zinco. O autor observou que a cultura respondeu a lâmina de irrigação, em termos de produtividade apresentou uma diferença significativa, sendo a mínima de 28,33 t ha<sup>-1</sup> e a máxima de 106,47 t ha<sup>-1</sup>; e, ainda que a cana de sequeiro

confere um prejuízo de R\$ 1,43 t ha<sup>-1</sup>, independentemente da combinação de níveis de adubação.

Outros estudos de adubação nitrogenada em cana-de-açúcar demonstram que essa cultura responde com maior produção de colmos e rendimento de açúcar e que essa adubação associada à incorporação de resíduos culturais ao solo faz com que a planta utilize maior quantidade total de Nitrogênio (N) (Trivelin et al., 2002), principalmente a partir da segunda soca, quando a fertilização propicia, possivelmente, a recomposição do vigor da soqueira (Vitti et al., 2007). A interação entre nutrientes, como é o caso de N e Potássio (K), também influencia significativamente o rendimento de colmos, açúcar e álcool (Moura et al., 2005), evidenciando a importância do balanço nutricional na eficiência de produção de fitomassa. Silva et al. (2008) observaram que maior produtividade de cana-de-açúcar foi observada para a cultivar que manteve maiores valores do número de massa e altura de colmos sob condições de estresse hídrico provocado por seca e, ainda, que o déficit hídrico reduz a quantidade e a razão da fluorescência da clorofila e o conteúdo relativo de água nas folhas. Recentemente, Gava et al. (2011) analisaram o efeito da tecnologia de irrigação por gotejamento, em Jaú, SP, em cultivares de cana-de-açúcar, em dois ciclos de produção (cana-planta e cana-soca). Neste estudo, o delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso, com quatro repetições, constituídos pela combinação de três cultivares de cana-de-açúcar (RB867515; RB855536 e SP80-3280) e dois manejos da cultura (sistema de irrigação por gotejamento subterrâneo e sistema de sequeiro), totalizando seis tratamentos. Os autores constataram que as cultivares respondem de forma diferenciadas na eficiência de utilização da água e, no manejo irrigado por gotejamento, houve elevação de 24% na produtividade de colmos e de 23% na produtividade de açúcar, em relação ao manejo de sequeiro.

## 2.2. Consumo hídrico de culturas

O consumo hídrico de culturas varia conforme os diferentes estádios fenológicos da cultura. Na elaboração e operacionalização de um projeto de irrigação, um dos fatores de maior importância é a quantificação precisa do volume de água necessário ao desenvolvimento adequado da cultura implantada. Procura-se identificar o momento preciso de irrigar, o sistema de irrigação a ser empregado e a lâmina de água a ser aplicada de forma a atender satisfatoriamente às necessidades hídricas das plantas e proporcionar maior viabilidade econômica da exploração agrícola.

Como a agricultura irrigada se apresenta, atualmente, como uma grande alternativa econômica para o Brasil, torna-se necessário que os recursos hídricos disponíveis sejam usados de forma racional, através da utilização de técnicas apropriadas de manejo da água, do solo e de cultivos. Assim, de acordo com Moreira (1993), o uso eficiente da água na agricultura irrigada é essencial, tornando-se imperativo a utilização de metodologias apropriadas para o planejamento e administração da irrigação. Por essa razão, fica cada vez mais evidenciada a necessidade da combinação correta dos diversos fatores que possibilitam a quantificação do volume de água a ser aplicado ao solo em cada irrigação. O volume de água necessário para a cultura da cana-de-açúcar atingir bons níveis de produtividade varia de 1.500 e 2.500 mm (Ometto, 1980). Além disso, a resposta de produtividade da cana-de-açúcar irrigada depende de um conjunto de fatores, destacando-se a quantidade de água e de fertilizantes, manejo de irrigação, da cultivar, idade de corte e do tipo de solo e do clima (Ramesh & Mahadevaswamy, 2000; Thorburn et al., 2003; Smit & Singels, 2006).

A estimativa adequada da evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ) consiste no principal parâmetro a ser considerado no dimensionamento e manejo de sistemas de

irrigação, uma vez que ela totaliza a quantidade de água utilizada nos processos de evaporação e transpiração pela cultura durante determinado período (Azevedo et al., 2007). Em muitas aplicações práticas, a  $ET_c$  é obtida através do valor da evapotranspiração potencial de uma cultura de referência ( $ET_o$ ) corrigida pelo coeficiente da cultura ( $K_c$ ), sendo ele dependente do tipo de cultura e de seu estágio de desenvolvimento. Para se fazer aplicações da evapotranspiração em diversas atividades, como na utilização de recursos hídricos, por exemplo, essa estimativa é um conhecimento de grande necessidade. De acordo com Wei & Sado (1994) para utilizar os recursos hídricos mais afetivamente, a estimativa precisa da evapotranspiração é muito importante. Para Medina et al. (1998), a estimativa da evapotranspiração é essencialmente importante para o planejamento de irrigação, perdas de água de reservatório, previsões de escoamento superficial e em estudos de meteorologia e climatologia. Em aplicações agrícolas, essas estimativas são ainda mais necessárias, pois a evapotranspiração é a quantidade total de água perdida pelo sistema, que deve ser determinada com maior cuidado possível a fim de manter sempre o sistema de cultivo em condições de máximo relacionamento com o meio (Silva et al., 2009).

Como nas áreas canavieiras do Brasil o total de precipitação anual varia de 1.100 a 1.500 mm por ano, para a obtenção de níveis elevados produtividade até atingir o potencial genético da cultura, o uso da tecnologia de irrigação é imprescindível (Farias , 2006). Nesse sentido, o clima das regiões tropicais favorece a prática de irrigação, com vistas a garantir e aperfeiçoar a produção agrícola, com base no conhecimento das necessidades hídricas de culturas e no dimensionamento e manejo dos sistemas de irrigação. As variáveis hídricas do solo, fatores relacionados à planta e à atmosfera e à profundidade efetiva das raízes são elementos essenciais no planejamento da irrigação. A planta necessita de uma quantidade de água aplicada com frequência adequada, que é

determinada por fatores de solo, clima e da própria cultura (Klar, 1991). Na agricultura irrigada é fundamental o conhecimento das necessidades hídricas das culturas. A evapotranspiração e a eficiência do uso de água são objetos de muitas pesquisas, principalmente com vistas ao planejamento da irrigação de diferentes culturas em várias partes do Brasil (Azevedo et al., 2003; Campos et al., 2007; Silva et al., 2009).

A transpiração é essencial para as plantas, pois ela age como solvente e agente transportador de nutrientes pelo floema e xilema, participa das atividades metabólicas, promove o resfriamento dos tecidos vegetais e mantém a turgescência das células (Klar, 1984). Para a determinação do consumo de água de uma cultura, a água do solo deve estar prontamente disponível, isto é, as condições de solo devem ser estabelecidas de forma que o fluxo de água atenda qualquer demanda atmosférica (Pereira et al., 1997). A quantidade de água disponível depende da habilidade das raízes em absorver a água do solo com que estão em contato, bem como das propriedades do solo no fornecimento e na condução dessa água até as raízes em uma proporção que satisfaça às exigências da transpiração. Uma das maneiras mais utilizadas de quantificação do consumo de água é através da medida da evapotranspiração.

### **2.3. Balanço hídrico no solo**

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 (Silva et al., 2009). O método do balanço hídrico se refere à contabilidade hídrica do solo, ou seja, consiste no cômputo do ganho (entrada), perda (saída) e armazenamento de água no solo. A água é fornecida à superfície do solo através da precipitação e/ou irrigação. Quanto à precipitação, o grau de molhamento do perfil do solo depende da

intensidade e duração da precipitação e da topografia do terreno. Assim, em solos com topografia acentuada, predomina o processo de escoamento superficial e a duração da precipitação não constitui fator importante no molhamento do solo. Entretanto, solos com topografia suave favorecem a infiltração e a duração da precipitação; logo, torna-se um fator importante para o processo de molhamento do perfil do solo, principalmente se a intensidade de precipitação é baixa (Campos et al., 2007).

O crescimento no setor sucroalcooleiro gera o questionamento sobre os impactos no ambiente, a necessidade do aumento da produtividade e a maior eficiência no uso da água pela cultura. Nesse aspecto, o método que possibilita o estudo mais detalhado das condições hídricas em que a cultura se desenvolveu é o que quantifica os processos da equação do balanço da água no solo (Silva, 2000; Antonino et al., 2000; Cintra et al., 2000; Timm et al., 2002; Azevedo et al., 2003; Cruz et al., 2005). 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. 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 num volume de solo, com base na configuração do sistema radicular da cultura em estudo, em determinado período de tempo.

Segundo Matzenauer (1999) a determinação da evapotranspiração de culturas agrícolas, sem limitação hídrica, é de grande interesse nas pesquisas agrônomicas. 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, principalmente para a evapotranspiração que depende diretamente 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 coeficiente de cultura 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 (Camargo, 1987). Esse método tem sido comumente utilizado na estimativa da evapotranspiração de diversas culturas, inclusive aquelas de grande porte (Silva, 2000; Ramos, 2001; Azevedo et al., 2003; Sousa, 2005; Moura, 2005).

Silva (2000) determinou o  $K_c$  para a mangueira irrigada no perímetro irrigado de Bebedouro, Petrolina, PE, utilizando os métodos do balanço hídrico no solo e balanço de energia pela razão de Bowen na determinação da evapotranspiração da mangueira. Os resultados mostraram taxas de evapotranspiração média no ano de 1998 de 4,6 mm dia<sup>-1</sup> pelo método do balanço hídrico no solo. Entretanto, no segundo ciclo produtivo, no ano de 1999, o autor encontrou taxas de evapotranspiração média de 3,5 mm dia<sup>-1</sup>.

Por outro lado, Azevedo et al. (2003) aplicaram a metodologia do balanço hídrico no solo em um pomar de mangueira irrigada no Submédio rio São Francisco e obtiveram a evapotranspiração de  $4,4 \text{ mm dia}^{-1}$ . Quando os resultados desta pesquisa foram comparados com a evapotranspiração determinada pelo método do balanço de energia com base na razão de Bowen foi observada grande similaridade entre os resultados. Ainda nesta linha de pesquisa, Sousa (2005) conduziu experimento de campo para estimar a evapotranspiração do coqueiro anão verde cultivado nos tabuleiros costeiros, no Estado de Sergipe. A evapotranspiração foi obtida com base no método do balanço hídrico no solo no período de janeiro a dezembro de 2003. Neste estudo, foram utilizados três tratamentos de irrigação: 50, 100 e 150 litros de água por planta. Os resultados desse trabalho indicaram que as taxas de evapotranspiração média do coqueiro foram 2,5; 2,9 e  $3,2 \text{ mm dia}^{-1}$ , nos tratamentos 50, 100, e 150 litros de água por planta, respectivamente. Moura (2005), utilizando a mesma técnica realizou um experimento para determinar  $K_c$  de um pomar de goiabeira cultivado na região do Submédio rio São Francisco. A evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ) foi obtida pelo método de Penman Monteith FAO (Food and Agriculture Organization) e a  $ET_c$  usando-se as metodologias do balanço de energia com base na razão de Bowen e do balanço hídrico no solo. O valor médio da  $ET_c$  no ciclo de frutificação da goiabeira pelos métodos do balanço de energia e balanço hídrico no solo foram 5,3 e  $6,0 \text{ mm dia}^{-1}$ , respectivamente.

No estudo da dinâmica de água no solo é fundamental o conhecimento da umidade e dos potenciais de água no solo. A umidade é apenas um índice que quantifica a água que o solo possui, enquanto que os potenciais de água dizem respeito aos diferentes tipos de energia potencial que atuam no sistema e podem dar indicação de como a água se encontra no solo, se parada ou em movimento (Libardi, 1995). Assim,

na contabilidade hídrica, o solo funciona como reservatório de água, a chuva ou a irrigação como entrada e a evapotranspiração como saída de água. O movimento cíclico da água começa com a infiltração no solo, continua com o seu armazenamento temporário na região do sistema radicular e termina com a sua remoção do solo por meio da drenagem, da evaporação e da absorção pelas raízes (Hillel, 1970).

Os componentes do balanço hídrico num volume de controle de solo (precipitação, irrigação, evapotranspiração, escoamento superficial, drenagem/ascensão capilar e variação do armazenamento de água no solo) são apresentados numa forma integral ou diferencial numa equação geral de balanço de massa. Atualmente, ênfase tem sido dada à disponibilidade de água no solo relacionada com elementos climáticos e com o desenvolvimento vegetal. A disponibilidade de água no solo não se baseia apenas em dados de precipitação pluvial, mas também é necessário levar em conta as perdas de água no solo para a atmosfera, que se verificam normalmente pela perda de água por evaporação mais transpiração vegetal (Andreatta, 1990). No cálculo do balanço hídrico no solo se considera um volume de controle no campo delimitado por duas superfícies paralelas - a interface solo-atmosfera (limite superior do volume ou simplesmente superfície do solo) e uma superfície horizontal localizada à profundidade do sistema radicular do cultivo (limite inferior do volume) (Libardi, 1995).

A confiabilidade do método do balanço hídrico no solo depende da precisão com que são medidos os componentes da equação de conservação de água. A maior dificuldade reside na determinação da drenagem profunda ou ascensão capilar. A vantagem desse método, quando comparado com os outros que utilizam medições agrometeorológicas acima da superfície, é a facilidade de obtenção e processamento dos outros dados (precipitação, irrigação e variação do armazenamento de água no solo). As principais desvantagens são as seguintes: menor nível de precisão e as dificuldades de

obtenção da evapotranspiração nos períodos chuvosos. Esse método não é apropriado para estimativas de evapotranspiração em base diária, porém, se a drenagem for bem avaliada, o método é aceitável para intervalos de dois ou três dias. Segundo Silva (2000) o método do balanço hídrico no solo mostra-se eficiente na determinação do pomar de mangueiras quando aplicado para o período de sete dias. Para períodos inferiores a uma semana, as medições tensiométricas podem não refletir efetivamente o volume de água armazenado no solo. Isso se deve ao fato da resposta lenta dos tensiômetros, em virtude do tempo necessário para que a cápsula porosa do instrumento entre em equilíbrio com o solo. Além disso, os tensiômetros não acusam variações de umidade quando o teor de água no solo está acima da capacidade de campo. Quando é aplicado em grandes áreas, o maior problema não é propriamente o método, mas a falta de uma boa representatividade da variação espacial das chuvas e também a falta de homogeneidade na topografia do terreno (Campos et al., 2007).

O estudo do balanço de água no solo com cana-de-açúcar, é cultivada em larga escala no Brasil, e essencial para o manejo agrícola, visando o aumento de produtividade e à redução de riscos de poluição. Neste contexto, 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 tanto a evapotranspiração real quanto à eficiência do uso da água foram da mesma ordem de grandeza, independentemente da adubação nitrogenada, e 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 palhicho 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.

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. 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 utilizam outros métodos porque não dispõe desses equipamentos, impossibilitando-os de determinar de forma confiável a demanda atmosférica pelo método-padrão estabelecido pela FAO.

O conhecimento dos valores precisos do  $K_c$  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. Nesse

particular, muitas pesquisas já foram realizadas visando a determinação mais precisa do consumo hídrico de diferentes culturas no Brasil. Entretanto, nenhuma delas trata do  $K_c$  da cultura da cana-de-açúcar. Assim, experimentos agrometeorológicos específicos, para a determinação do  $K_c$  dessa cultura irão propiciar maior precisão nas informações para a agricultura irrigada na região. Ressalta-se que o uso inadequado dos métodos de estimativa da  $ET_o$  às condições climáticas, a falta de precisão na estimativa, bem como o erro devido ao uso de instrumentos de medições, em geral, conduzem ao manejo inadequado da água, afetando muitas vezes a produção agrícola.

#### **2.4. Coeficiente de cultivo dual**

Doorenbos & Pruitt (1977), no boletim da FAO-24, sugeriram coeficientes para várias culturas cultivadas em diferentes condições climáticas. Esses valores foram bastante usados em lugares onde os dados locais não eram disponíveis. Em 1998, a Food and Agriculture Organization (FAO) das Nações Unidas, em seu Boletim FAO 56, disponibilizou informações sobre as necessidades hídricas de diversas culturas cultivadas em diferentes condições climáticas. O valor do coeficiente de cultura basal ( $K_{cb}$ ) incorpora a transpiração da planta com a camada superficial do solo seca, porém, apresentando um conteúdo de água na zona radicular suficiente para manter a transpiração plena. Os valores de  $K_{cb}$  são baixos, principalmente na fase inicial de cultivo. Por outro lado, a evaporação da superfície do solo é descrita pelo coeficiente de evaporação ( $K_e$ ), sendo maior na condição de maior umidade na superfície do solo, decrescendo à medida que o solo seca, podendo chegar a zero. Allen et al. (1998) afirmam que o procedimento do  $K_c$  dual permite calcular o incremento real do valor de  $K_c$ , que ocorre em cada dia, em função do desenvolvimento da planta e do umedecimento da superfície do solo. Esses autores acrescentam, ainda, que a maior

diferença entre os valores de  $K_c$  e  $K_{cb}$  ocorre na etapa inicial de crescimento da cultura, quando a evapotranspiração é constituída principalmente pela evaporação do solo e a transpiração da cultura é relativamente pequena. Quando a cobertura do solo for completa ou quase completa, durante a etapa de crescimento do ciclo de cultivo, a evaporação que ocorre por baixo da vegetação terá um efeito menor na evapotranspiração da cultura, assim o valor de  $K_{cb}$ , nessa etapa, será similar ao valor de  $K_c$ . A definição do  $K_{cb}$  se dá em função das fases de desenvolvimento da cultura, havendo quatro fases (inicial, desenvolvimento, médio e final) e três  $K_{cb}$  da cultura (tal como o  $K_c$  simples).

O calculo do  $K_c$  dual possibilita maior precisão, uma vez que o  $K_e$  varia muito, de acordo com os elementos meteorológicos e a umidade da superfície do solo, além de possuir peso maior na determinação do  $K_c$  durante a fase inicial da cultura, momento em que o solo se apresenta exposto e a capacidade transpirométrica da cultura está reduzida (Alves, 2009). Esse autor afirma, ainda, que durante a fase inicial da cultura, caso haja chuva ou irrigação freqüente, o componente de evaporação se eleva, promovendo um substancial aumento do  $K_c$ . A partir do pleno desenvolvimento vegetativo, e em razão do sombreamento do solo e da maior capacidade transpirométrica da cultura, o  $K_e$  torna-se menos representativo na formação do  $K_c$  dual, sendo o  $K_{cb}$  preponderante na obtenção do  $K_c$  simples. Para Moreira (2002) o  $K_c$  dual propicia condições de ajustes precisos no cálculo da necessidade hídrica das culturas, sobretudo na fase inicial, em culturas que expõem o solo por um período maior e em cultivos irrigados com pequeno turno de rega. O coeficiente de cultura, conforme bases teóricas analisadas por Allen et al. (1998), representa a integração dos efeitos de três características que distinguem a evapotranspiração da cultura de referência: (i) a altura da cultura ( $h$ ), que afeta a rugosidade e a resistência aerodinâmica, (ii) a resistência de superfície relativa pela

camada cultura - solo, que é afetada pela área foliar (determinando o número de estomas), pela fração de cobertura do solo pela vegetação, pela idade e condição das folhas e pelo teor de umidade à superfície do solo e (iii) o albedo da superfície cultura-solo, que é influenciado pela fração de cobertura do solo, pela vegetação e pelo teor de umidade à superfície do solo que influencia o saldo de radiação disponível à superfície, que é a principal fonte de energia para as trocas de calor e de massa no processo de evaporação.

López-Urrea et al. (2009) determinaram as necessidades hídricas da cebola irrigada por aspersão usando lisímetro de pesagem e determinaram os coeficientes de cultura simples e basal, bem como o relacionamento entre a componente da transpiração e a cobertura do solo. Por outro lado, o estudo Liu & Luo (2010) avaliaram se o método do  $K_c$  dual proposto pela FAO-56 é eficiente no cálculo da evapotranspiração real diária nas culturas de trigo e milho cultivadas na planície norte da China. Os valores dos coeficientes basais durante as fases inicial, intermediária e final das culturas de trigo e milho propostos por Allen et al. (1998) foram modificados para a região de estudo. Muito recentemente, Flumignan et al. (2011) utilizaram a metodologia de coeficiente de cultura dual para determinar as componentes da evaporação e transpiração da cultura do café cultivada por aspersão no Estado do Paraná, Brasil. Eles observaram que os valores da evaporação e da transpiração representaram, respectivamente, 35 e 65% da evapotranspiração da cultura.

De acordo com Allen et al. (1998), a maioria dos efeitos meteorológicos se encontra incorporada na estimativa de  $ET_o$ . Portanto, enquanto  $ET_o$  representa um indicador da demanda atmosférica, o coeficiente de cultura integra as características da cultura e varia de acordo com a fase fenologia (Doorenbos & Pruitt, 1977). A ET real pode ser inferior à ET potencial para uma cultura em condições de crescimento,

incluindo aqueles com estresse hídrico ou salinidade elevada. Visando o incremento da eficiência do uso da água, novas metodologias estão sendo desenvolvidas para estimar o consumo de água pelas culturas, principalmente nas fases iniciais de desenvolvimento das plantas, como o coeficiente dual de cultivo, apresentado por Allen et al. (1998), separando em dois os componentes da evapotranspiração da cultura, o componente da evaporação e o da transpiração. Esta metodologia permite predizer os efeitos gerados pelos eventos individuais de umedecimento do solo, no valor do coeficiente de cultivo, sendo possível estimar o coeficiente de evaporação e de redução da evaporação da superfície do solo. Esses autores apresentaram duas maneiras de se estimar o coeficiente de cultura, a primeira em que os efeitos da transpiração da cultura e da evaporação do solo são combinados em um  $K_c$  único e a segunda em que estes efeitos são determinados separadamente, se utilizando esses dois coeficientes.

O coeficiente basal da cultura ( $K_{cb}$ ) é obtido pela relação entre a  $ET_c$  e a  $ET_o$  quando a superfície do solo se encontra seca, mas a transpiração não é limitada pela água do solo. Ele representa a linha potencial do valor do  $K_c$  na ausência dos fatores adicionais introduzidos pelo umedecimento do solo pela precipitação pluvial ou pela irrigação (Andrade, 2008). Esse termo inclui, ainda, a evaporação residual produzida pela difusão da água do solo que se encontra embaixo da superfície seca do terreno. As duas formas do  $K_c$  são apresentadas no Boletim FAO-56, sendo  $K_c$  simples conforme apresentado no FAO-24 e o  $K_c$  dual foi introduzido no Boletim da FAO-56 em 1998. Em condições basais, pequenas quantidades de evaporação da camada superficial do solo ocorrem por difusão e são incluídos no  $K_{cb}$  (e, portanto, o  $K_{cb}$  inicial geralmente não é considerado zero durante o ciclo da cultura).

O componente de evaporação ( $K_e$ ) varia diariamente de acordo com a umidade na camada superficial do solo. Já o componente de transpiração possui comportamento

mais estável, sendo tabelado em faixas de variação para cada fase do ciclo da cultura (tal como o  $K_c$  único). Pode-se afirmar, portanto, que o  $K_c$  dual propicia condições de ajustes finos no cálculo da necessidade hídrica das culturas, sobretudo na fase inicial, em culturas que expõem o solo por um período maior e em cultivos irrigados com pequeno turno de rega (irrigação localizada), situações essas em que o componente de evaporação tende a se elevar, aumentando a possibilidade de erro, no caso de uso do  $K_c$  (Moreira, 2002). Estudos de  $K_c$  dual realizados em condições edafoclimáticas brasileiras são escassos, embora importantes para possibilitar uma avaliação sobre a precisão do uso de um  $K_c$  único e, talvez, contribuir para ajustá-los. O procedimento do  $K_c$  dual é preferível para os casos de programação de irrigação em tempo real, para os cálculos de balanço de água no solo e para atividades de pesquisa onde sejam importantes os efeitos das variações diárias de umedecimento do perfil do solo e seu impacto resultante no valor diário de  $ET_c$  (Alves, 2009).

A evaporação do solo após molhamento pela chuva ou irrigação é representada pelo  $K_e$  (coeficiente de evaporação), sendo o  $K_c$  dual a soma de  $K_{cb}$  e  $K_e$ . O cálculo do  $K_c$  dual possibilita maior precisão, uma vez que o  $K_e$  varia muito, em função dos elementos meteorológicos e a umidade da superfície do solo, sobretudo em estações chuvosas e utilizando irrigação em área total. O uso de planilhas aumenta a praticidade para realizar o cálculo diário do  $K_c$  dual, uma vez que requer o balanço hídrico diário nos primeiros 10 a 15 cm de profundidade, camada em que ocorre o processo evaporativo, necessário para determinação do coeficiente de evaporação ( $K_e$ ). O valor de  $K_e$  é reduzido à medida que o solo seca, chegando a zero quando não houver mais água disponível para a evaporação. O  $K_e$  possui peso maior na determinação do  $K_c$  durante a fase inicial da cultura, momento em que o solo se apresenta exposto e a capacidade transpirométrica da cultura está reduzida. Durante a fase inicial, caso haja

chuva ou irrigação freqüente (típico para irrigação localizada), o componente de evaporação se eleva, promovendo um substancial aumento do  $K_c$ . A partir do pleno desenvolvimento vegetativo e em razão do sombreamento do solo e da maior capacidade transpirométrica da cultura, o  $K_e$  torna-se menos representativo na formação do  $K_c$  dual, sendo o  $K_{cb}$  preponderante na definição daquele. O  $K_e$  descreve o componente da evaporação que ocorre na superfície do solo, podendo assumir valores elevados após o umedecimento do solo por irrigação ou precipitação pluvial. Esta redução é expressa pelo coeficiente de redução da evaporação da água do solo ( $K_r$ ), considerando o primeiro e o segundo estágio do processo de evaporação.

Durante o primeiro estágio da evaporação, a qual acontece logo após uma irrigação ou precipitação pluvial, a superfície do solo se mantém úmida e o processo de evaporação se dá a uma taxa máxima, limitada somente pela quantidade de energia da radiação solar disponível na superfície do solo (Allen et al., 1998). Este estágio se mantém até que as perdas acumuladas de evaporação sejam tais que as propriedades hidráulicas do solo comecem a ser limitantes, não sendo possível a manutenção do suprimento de água para a superfície do solo para que o processo ocorra potencialmente. A lâmina de evaporação acumulada nesta etapa é igual à água prontamente evaporável (REW), a qual representa a quantidade de água que pode ser perdida por evaporação sem restrições da camada superficial, dependendo basicamente da textura do solo. Para o segundo estágio da evaporação, o qual inicia quando a evaporação acumulada supera a REW, a superfície do solo se encontrará seca e a evaporação a partir da porção exposta do solo se reduzirá proporcionalmente a quantidade de água remanescente na camada superficial do solo. Assim, o coeficiente de redução da evaporação do solo ( $K_r$ ) é calculado diariamente.

Em condições de cultivo em sistema de sequeiro é necessário ajustar a evapotranspiração da cultura em face de possíveis efeitos de estresse hídrico no solo, que pode ocorrer também se a irrigação for abaixo do nível de exigência hídrica da planta. A evapotranspiração da cultura ajustada corresponde à taxa de evaporação de uma cultura agrícola com restrições ou deficiências na absorção de água (déficit hídrico), problemas como a salinidade do solo, baixa fertilidade do solo, aplicação limitada de fertilizantes, presença de horizontes do solo duros ou impenetráveis, ausência de controle de doenças e pragas, manejo deficiente do solo e outros problemas que podem limitar o desenvolvimento da cultura e reduzir a evapotranspiração (Allen et al., 1998). Dessa forma, a cultura não atinge a produção potencial máxima devido a essas restrições.

O total de água disponível se refere à capacidade do solo reter água para as plantas. A água disponível na zona radicular é a diferença entre a quantidade de água na capacidade de campo e o ponto de murcha permanente. Define-se a capacidade de campo como sendo a quantidade de água que um solo bem drenado pode absorver água contra as forças gravitacionais, ou seja, é a quantidade de água remanescente depois da drenagem do solo e o ponto de murcha permanente é a quantidade de água na qual a planta murcha permanentemente (Allen et al., 1998). Quando o conteúdo de água no solo se encontra abaixo de um valor limite, a água no solo não pode ser transportada facilmente na zona de raiz para responder a demanda da transpiração e a planta começa a experimentar estresse. Efetivamente, quando a umidade do solo decresce abaixo dos níveis que a cultura não consegue absorver água, ela já não pode ser transportada tão rapidamente para as raízes para responder a demanda da transpiração da cultura e ela começa a entrar em estresse hídrico.

O conteúdo de água na zona radicular também pode ser expresso pela redução de água na zona de raiz ( $D_r$ ), isto é, escassez de água em relação à capacidade de campo. Na capacidade de campo, a redução de água na zona de raiz é zero ( $D_r = 0$ ). Portanto, quando a umidade do solo na zona radicular, estiver à capacidade de campo, não ocorre déficit hídrico na zona radicular e, portanto, a depleção na zona radicular será igual a zero. Se a depleção de água na zona radicular ( $D_r$ ) exceder a água facilmente utilizável na zona radicular (RAW), a água não pode ser transportada tão rapidamente para as raízes para responder a demanda da transpiração da cultura e ela começa a entrar em estresse hídrico. Quando a água é extraída do solo por evapotranspiração, a redução de água no solo aumenta e, portanto, o estresse será induzido quando  $D_r$  torna-se igual a RAW. Após a redução de água na zona de raiz ultrapassa RAW (o conteúdo abaixo do valor limite  $\theta_t$ ), a redução é suficientemente alta para limitar a evapotranspiração, que começa a diminuir de acordo com a quantidade de água restante na zona de raiz.

A estimativa do coeficiente de estresse hídrico ( $K_s$ ) requer o cálculo do balanço hídrico diário na zona de raiz da planta. A evapotranspiração pode também ser determinada pela medição das diversas componentes do balanço de água no solo (Allen et al., 1998). O método consiste em avaliar o fluxo que entra e que sai na zona radicular da cultura em determinado período de tempo. A irrigação (I) e a precipitação (P) adicionam água à zona radicular. Uma parte de I e de P podem ser perdida por escoamento superficial (RO) e por percolação profunda. Depois de uma irrigação ou precipitação elevada, a umidade no solo excede a capacidade de campo. O volume de água acima da capacidade de campo é assumido como perda no mesmo dia por percolação profunda, seguido de ET no mesmo dia. Assumindo que a zona radicular está à capacidade de campo, o valor para a depleção é zero. Após a percolação profunda e à medida que ET ocorre, a quantidade de água na zona radicular começa a decrescer

gradualmente e a depleção na zona radicular ( $D_{ri}$ ) começa a aumentar. Na ausência de qualquer precipitação, a umidade do solo na zona radicular aproxima-se do seu valor mínimo que é o valor de PMP. Neste momento, existe pouca água na zona radicular para a ET, e o  $K_s$  aproxima-se a zero, e a redução da zona radicular ( $D_{ri}$ ) aproxima-se do seu valor máximo que é o TAW. O valor de  $D_{ri}$  possível será  $0 \leq D_{ri} \leq TAW$  (Allen et al., 1998).

Para efeitos de simplificação do modelo e porque a componente de escoamento superficial (RO) é difícil de estimar, bem como, tomando-se em consideração que as práticas agrícolas tentam eliminar esse componente, assume-se que o escoamento superficial é igual a zero (RO=0). A quantidade de água transportada do lençol freático para a zona de raiz por ascensão capilar (CR) depende do tipo de solo, profundidade do lençol freático e da umidade da zona radicular. O termo CR pode ser normalmente considerado nulo quando o lençol freático se encontra numa profundidade maior do que 1 metro.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. Descrição da área de estudo

O experimento de campo foi realizado na Fazenda Capim II pertencente a Miriri Alimentos e Bioenergia S/A, durante o ciclo produtivo da cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum L.*) no período de 10 de outubro de 2009 a 10 setembro de 2010. A empresa pertence ao grupo Cavalcante de Moraes, situada no município de Santa Rita, PB. A variedade de cana-de-açúcar estudada foi a RB 92 579, muito difundida na região Nordeste do Brasil. A Fazenda Capim II está situada geograficamente na latitude 6°56'S, longitude 35°07'W, e possui uma área irrigada de aproximadamente 4.000 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, dentro de uma região propícia ao cultivo desta cultura, 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, com seca atenuada (Silva, 2004). A Figura 1 exibe a localização da área de estudo no mapa da Fazenda Capim II, Capim/Paraíba.

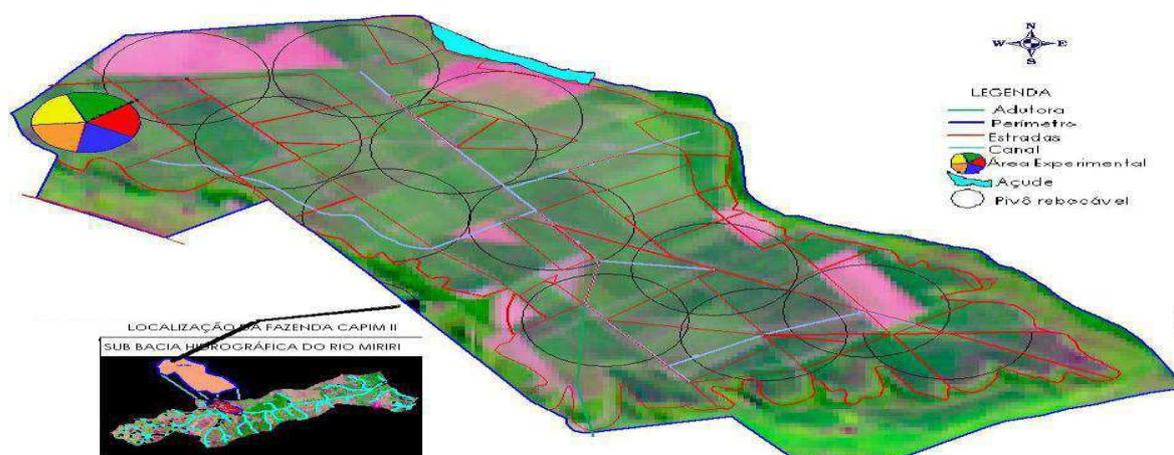


Figura 1. Localização da Fazenda Capim II, com destaque da área de estudo.

### 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. O balanço hídrico no solo foi realizado numa parcela irrigada com base em 100% da evapotranspiração de referência cujos dados para a sua determinação foram obtidos na PCD (Plataforma de Coleta de Dados) do INPE, localizada na Miriri Alimentos e Bioenergia, no Estado da Paraíba, cerca de 2.000 metros da área experimental. A altura da planta no tratamento de 100% da evapotranspiração de referência foi medida considerando o espaço entre o corte (na base) e o último internódio (no ápice da planta). Esse procedimento também foi utilizado por Farias (2006) e Gouveia Neto (2009) em experimento de campo realizado na mesma área experimental.

### 3.3 Método

#### 3.3.1. Coeficiente de cultivo simples

O coeficiente de cultura foi obtido como a razão entre  $ET_c$  da cana-de-açúcar e a evapotranspiração de referência  $ET_o$  definido por dados meteorológicos. Na nomenclatura da FAO-56 o  $K_c$  é expresso por:

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_o} \quad (1)$$

em que  $ET_c$  é a evapotranspiração da cultura,  $\text{mm.dia}^{-1}$ ;  $ET_o$  é a evapotranspiração de referência,  $\text{mm.dia}^{-1}$  e  $K_c$  é o coeficiente da cultura, adimensional.

#### 3.4. Coeficiente de cultura dual

O coeficiente basal da cultura ( $K_{cb}$ ) que descreve a transpiração da planta e o coeficiente de evaporação da água do solo ( $K_e$ ) que descreve a evaporação que ocorre

na superfície do solo, de forma que o  $K_c$  seja representado conforme a equação, chamada de  $K_c$  dual.

$$K_{cdual} = K_{cb} + K_e \quad (2)$$

em que  $K_{cdual}$  é o coeficiente da cultura dual, adimensional;  $K_{cb}$  é o coeficiente basal da cultura, tabelado por fase fenológica, adimensional; e  $K_e$  é o coeficiente de evaporação de água do solo, adimensional.

### 3.4.1. Coeficiente basal da cultura

O primeiro passo para a estimativa do  $K_{cb}$  foi a definição da duração das fases de crescimento da cultura, definidas como: fase inicial, desenvolvimento, média e final. Em seguida, foi feita a seleção de valores de  $K_{cb}$  (Tab) para essas fases conforme sugeridos por Allen et al. (1998). Estes autores apresentaram valores tabelados de  $K_{cb}$  para diversas culturas. No entanto, tais valores foram determinados para climas subúmidos ( $UR \approx 45\%$ ) e com velocidade de vento moderada ( $u_2 \approx 2 \text{ m s}^{-1}$ ). Para condições climáticas diferentes desta, como é o caso da região que foi realizado o presente trabalho, é necessário ajustar os valores de  $K_{cb}$  (Tab), utilizando-se a seguinte equação:

$$K_{cb} = K_{cb(Tab)} + [0,04(u_2 - 2) - 0,004(UR_{min} - 45)] \left( \frac{h}{3} \right)^{0,3} \quad (3)$$

em que  $K_{cb}$  é coeficiente basal da cultura, para cada fase fenológica,  $K_{cb(Tab)}$  é o valor do  $K_{cb}$  tabelado conforme sugerido por Allen et al. (1998),  $u_2$  é velocidade do vento média diária, a 2 m de altura ( $\text{m s}^{-1}$ );  $UR_{min}$  é a umidade relativa mínima média diária em (%) e  $h$  é altura da planta (m). Os valores dos coeficientes de cultivo simples ( $K_c$ ) e basal ( $K_{cb}$ ), bem como a duração dos estádios fenológicos da cana-de-açúcar, de acordo com o Boletim 56 da FAO (Allen et al., 1998), são apresentados na Tabela 1. Por outro

lado, os valores de  $K_{cb}$  e  $K_c$  simples para qualquer dia  $i$  do ciclo da cultura foram calculados pela equação:

$$K_{c(i)} = K_{c(ant)} + \left( \frac{i - \sum L_{(ant)}}{L_{(período)}} \right) (K_{c(prox)} - K_{c(ant)}) \quad (4)$$

em que  $K_c(i)$  é o coeficiente da cultura no dia  $i$ ;  $i$  é o número do dia do período de crescimento;  $L_{período}$  é a duração do período;  $\sum L_{(ant)}$  é o somatório das durações dos períodos anteriores;  $K_{c(ant)}$  é o coeficiente da cultura do período anterior e  $K_{c(prox)}$  é o  $K_c$  do próximo período.

Tabela 1. Duração dos estádios fenológicos da cana-de-açúcar cultivada em latitudes tropicais e os valores dos coeficientes de cultivos simples ( $K_c$ ) e basal ( $K_{cb}$ )

Estádio/duração	Inicial	Desenv.	Médio	Final
	Duração do estágio fenológico (dias)			
	30	50	180	60
Estádio/ $K_c$	Coeficientes de cultivos (adimensional)			
$K_c$ - simples	0,40	0,40	1,25	0,75
$K_{cb}$ - basal	0,15	0,15	1,20	0,70

Fonte: Boletim 56 da FAO (Allen et al., 1998)

### 3.4.2. Coeficiente de evaporação de água no solo

O coeficiente de evaporação de água do solo após molhamento pela chuva ou irrigação é representado pelo  $K_e$  (coeficiente de evaporação), definida pela seguinte equação:

$$K_e = K_r (K_{c \text{ máx}} - K_{cb}) \leq f_{ew} K_{c \text{ máx}} \quad (5)$$

em que  $K_e$  é o coeficiente de evaporação de água do solo, adimensional;  $K_{c \text{ máx}}$  é o máximo valor do  $K_c$  após chuva ou irrigação, adimensional;  $K_r$  é o coeficiente de redução da evaporação, dependente do acúmulo da lâmina de água evaporada da superfície do solo diariamente, adimensional; e  $f_{ew}$  é a fração do solo exposta e

molhada, em %. A evaporação ocorre predominantemente na fração exposta do solo e, conseqüentemente, a evaporação é restrita pela energia disponível na fração exposta do solo. Por isso,  $K_e$  não pode exceder  $f_{ew} \times K_{c \max}$  (segundo termo da equação). Para o cálculo diário do  $K_e$ , então, é necessário seguir três passos: calcular  $K_{c \max}$ ,  $K_r$  e  $f_{ew}$ .

O  $K_{c \max}$  representa o limite máximo da evapotranspiração de qualquer superfície cultivada, variando dentro da faixa de 1,05 a 1,30 e pode ser calculado pela equação:

$$K_{c \max} = \max \left\{ \left[ 1,2 + [0,04(u_2 - 2) - 0,004(UR_{\min} - 45)]x \left( \frac{h}{3} \right)^{0,3} \right], \{K_{cb} + 0,05\} \right\} \quad (6)$$

Os valores de  $u_2$ ,  $UR_{\min}$  e  $h$ , utilizados nesta equação foram os mesmos utilizados para a estimativa do  $K_{cb}$  (Eq. 3). Quando os valores dos Kcs médio e final são inferiores a 0,45 e a umidade relativa e velocidade do vento diferem de 45% e 2 m s<sup>-1</sup>, respectivamente, eles devem ser ajustados de acordo com as seguintes equações:

$$K_{c \text{ med}} = K_{c \text{ méd (Tab)}} + [0,04(u_2 - 2) - 0,004(UR_{\min} - 45)] \left( \frac{h}{3} \right)^{0,3} \quad (7)$$

$$K_{c \text{ fin}} = K_{c \text{ fin (Tab)}} + [0,04(u_2 - 2) - 0,004(UR_{\min} - 45)] \left( \frac{h}{3} \right)^{0,3} \quad (8)$$

No primeiro estágio, a energia incidente é quem limita a evaporação, pois a superfície está molhada (após chuva ou irrigação); nesse estágio, o  $K_r$  é igual a 1. Quando a água contida na superfície do solo se torna limitante para o processo evaporativo, o  $K_r$  decresce e torna-se zero quando a quantidade total de água evaporável da superfície do solo se extingue. No segundo estágio, o  $K_r$  é calculado pela equação abaixo (Allen et al., 1998).

$$K_r = \frac{TEW - D_{e,i}}{TEW - REW} \quad (9)$$

em que TEW é a lâmina d'água total evaporável da camada superficial do solo, em mm; e  $D_{e,i}$  (início) é a lâmina d'água acumulada evaporada da camada superfície do solo no início do dia (é igual ao final do dia anterior), quando a precipitação ou irrigação ocorre no início do dia, em mm; finalmente REW é a lâmina d'água facilmente evaporável no primeiro estágio (quando  $K_r=1$ ). A lâmina total evaporável da camada superficial (TEW) é dependente dos limites de água disponível no solo e da profundidade da superfície do solo que perde água por meio da evaporação, ou seja:

$$TEW = \frac{(CC - 0,5PMP)}{10} \times Z_e \quad (10)$$

em que CC é a capacidade de campo, em %; PMP é o ponto de murcha, em %; e  $Z_e$  é a profundidade da superfície do solo sujeita a evaporação, em cm (10 a 15 cm). A água facilmente evaporável (REW) é estimada pela equação a seguir:

$$REW = 8 + 0,08Arg \quad (11)$$

em que Arg é o teor médio de argila no solo, na camada de 0-30 cm (FAO 56). As lâminas d'água acumuladas evaporadas da camada superficial do solo são determinadas a partir do balanço hídrico diário da camada superficial do solo ( $D_{e,i}$ ) com objetivo de determinar a lâmina acumulada de evaporação. Logo o balanço hídrico diário é determinado por meio da seguinte equação:

$$D_{e,i} = D_{e,i-1} - (P_i - RO_i) - \frac{I_i}{f_w} + \frac{E_i}{f_{ew}} + T_{ew,i} + DP_{e,i} \quad (12)$$

em que  $P_i$  é a precipitação no dia  $i$ , (mm);  $RO_i$  é o escoamento superficial do solo no dia  $i$ , em mm;  $I_i$  é a lâmina de irrigação no dia  $i$ , em mm;  $E_i$  é a evaporação no dia  $i$ , em mm;  $T_{ew,i}$  é a lâmina transpirada na fração exposta e umedecida da superfície do solo no dia  $i$ , em mm;  $DP_{e,i}$  representa as perdas por percolação profunda no dia  $i$ , em mm;  $f_w$  é a

fração da superfície do solo molhada pela irrigação ou precipitação;  $f_{ew}$  a fração exposta e molhada da superfície. Os termos  $E_i$  e  $DP_{e,i}$  são dados pelas equações a seguir.

$$E_i = K_e \times ET_o \quad (13)$$

$$DP_{e,i} = (P_i - RO_i) + \frac{I_i}{f_w} - D_{e,i-1} \quad (14)$$

A Eq. (14) é válida para  $DP_{e,i} > 0$ , caso contrário,  $DP_{e,i} = 0$ . O termo  $T_{ew,i}$  é considerado zero com base nas observações feitas por Allen et al. (1998) em que a transpiração ocorrida na camada evaporante do solo é pequena e pode ser ignorada. Os valores de  $P_i$  foram obtidos na PCD e  $I_i$  foi determinado com base em 100% da  $ET_o$ . A fração exposta e molhada da superfície ( $f_{ew}$ ) define a percentagem da área de cultivo mais susceptível ao processo evaporativo e é calculada pela seguinte equação:

$$f_{ew} = \min(1 - f_c, f_w) \quad (15)$$

em que  $f_c$  é a fração média de solo coberto;  $1 - f_c$  é a fração média de solo exposto e não coberto (ou sombreado) por vegetação, variando de 0,01 a 1; e  $f_w$  é a fração da superfície do solo molhada pela irrigação ou precipitação, variando de 0,01 a 1.

Quando  $f_c$  não é medido em campo, ela pode ser estimada pela seguinte equação:

$$f_c = \left( \frac{K_{cb} - K_{c \min}}{K_{c \max} - K_{c \min}} \right)^{(1+0,5h)} \quad (16)$$

em que  $f_c$  é a fração média de solo coberto,  $K_{cb}$  o coeficiente de cultura basal,  $K_{c \min}$  é o  $K_c$  mínimo para solo seco nu sem nenhuma cobertura de solo (0,15-0,20),  $K_{c, \max}$  é o  $K_c$  máximo logo após o umedecimento do solo e  $h$  a altura da planta (m).

### 3.4.3. Evapotranspiração em condições de estresse de água

Os efeitos de estresse de água no solo são obtidos pelo produto do coeficiente de cultivo basal e o coeficiente de estresse de água ( $K_s$ ), da seguinte forma:

$$ET_{aj} = (K_s K_{cb} + K_e) ET_o \quad (17)$$

Para condições em que ocorrem limitações de água no solo  $K_s < 1$ ; entretanto, quando não existe estresse de água no solo  $K_s = 1$ . O termo  $K_s$  incorpora os efeitos do estresse de água na evapotranspiração da cultura. Quando é usado o coeficiente de cultivo simples, tem-se:

$$ET_{aj} = K_s K_c ET_o \quad (18)$$

Como o estresse de água no solo impacta apenas a evapotranspiração, a Eq. (17) oferece estimativas mais precisas do que a Eq. (18). Os procedimentos para a obtenção do coeficiente de estresse de água são apresentados a seguir.

#### **3.4.4. Total de água disponível (TAW)**

Após uma chuva forte ou irrigação, o solo drena até alcançar a capacidade de campo, o total de água disponível na zona de raiz é dado por:

$$TAW = 1000(\theta_{cc} - \theta_{PMP})Z_r \quad (19)$$

em que TAW é o total de água disponível na zona de raiz (mm),  $\theta_{cc}$  é o conteúdo de água à capacidade de campo ( $m^3 m^{-3}$ ),  $\theta_{PMP}$  é o conteúdo de água no ponto de murcha permanente ( $m^3 m^{-3}$ ) e  $Z_r$  é a profundidade da raiz (m).

#### **3.4.5. Água facilmente disponível (RAW)**

A fração de TAW que a cultura pode extrair sem sofrer estresse é chamada de água no solo facilmente disponível (RAW) dada por:

$$RAW = pTAW \quad (20)$$

em que RAW é a água no solo facilmente disponível na zona de raiz (mm), P é a fração média de TAW que pode ser reduzida da zona de raiz antes do estresse de

umidade. O valor adotado nesta pesquisa foi de 0,65 para a cana-de-açúcar (Allen et al., 1998).

Os efeitos do estresse hídrico na ET da cultura são descritos pela redução do valor do coeficiente de cultivo. Tais efeitos são obtidos através da multiplicação do coeficiente de cultura pelo coeficiente de estresse hídrico ( $K_s$ ). Portanto, o coeficiente de estresse hídrico assume as seguintes condições:

$$K_s = 1, \text{ para } Dr_{i-1} \leq RAW \quad (21)$$

$$K_s = \frac{TAW - Dr_{i-1}}{TAW - RAW} \text{ para } Dr_{i-1} > RAW \quad (22)$$

em que  $K_s$  é o coeficiente de estresse hídrico que depende da água disponível no solo [0-1],  $Dr_{i-1}$  é a redução de água na zona radicular no dia anterior (mm), TAW é o total de água disponível na zona radicular do solo (mm) e RAW é a água facilmente disponível na zona radicular (mm).

#### 3.4.6. Balanço de água na zona radicular

A depleção (ou redução) de água na zona radicular no final do dia  $i$  pode ser estimada por:

$$Dr_i = Dr_{i-1} - P_i + RO_i - I_i - CR_i + ET_i + DP_i \quad (23)$$

em que  $Dr_i$  é a redução de água na zona radicular no final do dia  $i$  (mm),  $Dr_{i-1}$  é a redução de água na zona radicular no fim do dia anterior,  $i-1$  (mm),  $P_i$  é a precipitação no dia  $i$  (mm),  $RO_i$  é o escoamento superficial do solo no dia  $i$  (mm),  $I_i$  é a irrigação no dia  $i$  (mm),  $CR_i$  é a ascensão capilar a partir da coluna do lençol freático no dia  $i$  (mm),  $ET_i$  é a Evapotranspiração da cultura no dia  $i$  (mm), e  $DP_i$  as perdas de água fora da zona radicular por percolação no dia  $i$  (mm). No primeiro dia de elaboração do balanço  $Dr_{i-1} = RAW$ ; em seguida, o  $Dr_i$  no final do dia é obtido pela Eq. 23.

Para iniciar o balanço de água na zona radicular, a redução inicial ( $Dr_{i-1}$ ) na zona radicular no primeiro dia deve ser estimada. A redução inicial pode ser derivada a partir da quantidade de água no solo por:

$$Dr_{i-1} = 1000(\theta_{CC} - \theta_{i-1})Z_r \quad (24)$$

em que,  $i-1$  (mm),  $\theta_{i-1}$  é a umidade do solo à capacidade de campo em ( $m^3/m^3$ ),  $\theta_{i-1}$  a umidade de solo médio na zona radicular em ( $m^3/m^3$ ).

Após forte chuva ou irrigação, a umidade do solo na zona radicular pode exceder a capacidade campo. Nesse caso, presume-se que a umidade do solo está em capacidade de campo nesse dia, de forma que a  $Dr_i$  na Eq. 23 torna-se nula. Assim, após fortes chuvas ou irrigação a percolação é dada por:

$$DP_i = (P_i - RO_i) + I_i - Dr_{i-1} \quad (25)$$

### 3.5. Medições da evapotranspiração da cultura

A evapotranspiração da cana-de-açúcar ( $ET_c$ ) foi determinada pelo método do balanço hídrico no solo, expresso por (Libardi, 1995):

$$ET_c = P + I + A - D \pm \Delta W \pm R \quad (26)$$

em que  $P$  é a precipitação pluviométrica;  $I$  a lâmina de irrigação;  $A$  a ascensão capilar;  $D$  a drenagem profunda;  $\Delta W$  a variação da lâmina de água disponível no solo e  $R$  o escoamento superficial. Todos os componentes da Eq. (26) são expressos em  $mm\ d^{-1}$ . 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.

Como o lençol freático na área de estudo é superior a 1 m de profundidade, o termo ascensão capilar foi considerado nulo e, também, como não foram instalados tensiômetros para monitorar a tensão de água no solo, a drenagem foi obtida com base na Eq. (25). O armazenamento de água no solo ( $W$ ), em mm, durante um dado intervalo de tempo foi calculado usando-se a seguinte equação

$$W_t = \int_0^L \theta(z) dz = \bar{\theta} L \quad (27)$$

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:

$$\Delta W = W_t - W_{t-1} \quad (28)$$

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.

### 3.6. Dados 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.

### 3.7. Evapotranspiração de referência

A evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) é definida como a taxa de evapotranspiração de uma cultura de referência hipotética, para a qual se assume uma altura de 0,12 m, uma resistência de superfície constante de  $70 \text{ s m}^{-1}$  e um albedo de 0,23, semelhante à evapotranspiração de uma extensa área coberta de relva verde de altura uniforme, em crescimento ativo, cobrindo totalmente o solo e bem abastecido de água. Consequentemente, como descrito em Allen et al. (1998), a equação para  $ET_0$  tem a forma comumente designada como a equação FAO-PM para a evapotranspiração de referência:

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{C_n}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + C_d u_2)} \quad (29)$$

em que  $ET_0$  é a evapotranspiração de referência ( $\text{mm d}^{-1}$ ),  $R_n$  o saldo de radiação à superfície da cultura ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ),  $G$  é a densidade do fluxo de calor do solo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ),  $T$  é a média da temperatura do ar a 2 m de altura ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $u_2$  é a velocidade do vento a 2 m de altura [ $\text{m s}^{-1}$ ],  $(e_s - e_a)$  é o déficit da pressão de vapor medido a 2 m de altura (kPa),  $\Delta$  é a declinação da curva de pressão de vapor ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ),  $\gamma$  constante psicrométrica ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ),  $C_n$  é o coeficiente para a cultura de referência ( $\text{kJ}^{-1} \text{ kg K}$ ) resultante da conversão de segundos para dias ou horas e de coeficientes devidos à substituição das variáveis  $r$ ,

$c_p$  e  $r_a$ ,  $C_d$  é o coeficiente de vento para a cultura de referência ( $\text{kJ}^{-1} \text{kg} \text{ } ^\circ\text{K}$ ), resultante da razão das resistências aerodinâmica e estomática, 0,408 é o valor para  $1/L$  com  $L=2,45$   $\text{MJ kg}^{-1}$ ,  $C_n = 900$  para cálculos diários e  $C_n = 37$  ( $= 900/24$ ) para cálculos horários, Assumindo-se  $r_s = 70 \text{ s m}^{-1}$  tem-se  $C_d = 0,34$  para cálculos diários. Para cálculos horários é preferível distinguir as horas de noite e de dia, fazendo  $r_s = 50 \text{ s m}^{-1}$  durante as horas do dia e  $r_s = 200 \text{ s m}^{-1}$  durante as horas de noite (Allen et al., 1998). Nessas condições, tem-se  $C_d = 0,24$  para as horas de dia ( $R_n > 0$ ) e  $C_d = 0,96$  para as horas de noite ( $R_n \leq 0$ ). O fluxo de calor sensível para o solo ( $G$ ) assume-se como nulo para cálculos diários; para cálculos horários,  $G = 0,1 R_n$  durante as horas de dia e  $G = 0,5 R_n$  durante as horas de noite.

A curva dos coeficientes de cultivos foi construída através dos passos seguintes:

(i) dividindo o ciclo vegetativo em quatro períodos de acordo com a fenologia e o desenvolvimento da cultura: (1) período inicial, (2) período de desenvolvimento, (3) período médio e (4) período final; (ii) Identificando os três valores de  $K_c$  que correspondem a  $K_{c \text{ ini}}$ ,  $K_{c \text{ med}}$  e  $K_{c \text{ fin}}$ , para culturas anuais, os  $K_c$ 's compreendem os seguintes períodos:  $K_{c \text{ (ini)}}$ : da sementeira ou plantação até  $\approx 10\%$  de cobertura do solo,  $K_{c \text{ mid}}$ : desde que se atinge o desenvolvimento vegetativo pleno até o início da senescência ou a mudança de coloração das folhas e o  $K_{c \text{ fin}}$  data de colheita ou do início da dormência.

### 3.8. Área foliar e índice de área foliar

Na determinação da Área Foliar, foram utilizados perfuradores (vazadores com diâmetro de 20 e 13 mm) relacionando-se, através de método gravimétrico, a área dos círculos e seus respectivos pesos de fitomassa seca, com o peso da fitomassa seca do restante da folha; obteve-se, assim, a área foliar de cada folha fotossinteticamente ativa (Farias, 2006).

O Índice de Área Foliar (IAF) foi obtido relacionando-se a área foliar produzida em uma unidade de área do terreno ( $\text{cm}^2 \text{cm}^{-2}$ ).

### 3.9. 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 nos coeficientes simples e dual (modelados usando a metodologia da FAO/56) com base no erro médio dos desvios (EMD) e a raiz quadrada do quadrado médio do erro normalizado (RQMDN), conforme utilizados por Silva et al. (2010), bem como a análise tradicional de correlação linear.

$$\text{EMD} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\text{ET}_{\text{est}} - \text{ET}_{\text{obs}}}{n} \right) \quad (30)$$

$$\text{RQMDN} = \frac{\left[ \sum_{i=1}^n (\text{ET}_{\text{est}} - \text{ET}_{\text{obs}})^2 / n \right]^{1/2}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{ET}_{\text{obs}}} \quad (31)$$

em que  $\text{ET}_{\text{est}}$  = é a evapotranspiração da cana-de-açúcar estimada como base nos coeficientes simples e dual,  $\text{ET}_{\text{obs}}$  = 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

Os parâmetros necessários para a elaboração dos balanços hídricos no solo na camada superficial de 0 a 0,1m e na zona do sistema radicular da cultura da cana-de-açúcar, com vistas a determinação do coeficiente de evaporação de água no solo, coeficiente de estresse hídrico e da drenagem do solo são apresentados na Tabela 2. Os dados de capacidade de campo e de murcha permanente foram obtidos em Gouveia Neto (2009). O sistema de irrigação aplicado foi por aspersão, via pivô central, para se aplicar a lâmina correspondente a 100% da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>). Dessa forma, a fração úmida do solo ( $f_w$ ) produzida por esse sistema de irrigação foi de 100%. A profundidade da camada superficial para a elaboração do balanço hídrico no topo da camada de solo foi de 0,1m.

Tabela 2. Parâmetros usados na determinação do coeficiente de evaporação de água no solo ( $K_e$ ), coeficiente de estresse hídrico ( $K_s$ ) e da drenagem do solo (D)

Parâmetros usados	Símbolo	Unidades	Valor
Capacidade de campo	$\theta_{CC}$	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	0,637
Ponto de murcha permanente	$\theta_{PMP}$	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	0,388
Lâmina total evaporável da camada superficial	TEW	mm	44,3
Lâmina de água facilmente evaporável	REW	mm	8,0
Total de água disponível	TAW	mm	24,9
Água facilmente disponível	RAW	mm	16,2
Fração úmida do solo	$f_w$	-	1,0
Profundidade da cama da superficial do solo	$Z_r$	m	0,1

Os parâmetros exibidos na tabela 2 permitiram a obtenção do coeficiente de evaporação de água do solo ( $K_e$ ) e do coeficiente de cultivo dual ( $K_c$ -dual), conforme se observa na Figura 2. Os valores de  $K_{cb}$  variaram de 0,15, na fase inicial da cultura, até o valor máximo 1,22 na fase média do seu ciclo de desenvolvimento. O  $K_e$  foi bastante

elevado na fase inicial da cultura em face do solo se encontrar descoberto e, portanto, a componente da transpiração da planta ( $K_{cb}$ ) tem uma contribuição menor na composição do coeficiente de cultivo. Entretanto, na fase média, quando a cultura já se encontrava bastante desenvolvida, a componente da transpiração foi dominante e a evaporação de água no solo foi reduzida significativamente, apresentando um leve aumento no final do ciclo em decorrência do amadurecimento da planta e da permanência de irrigação nessa fase da cultura.

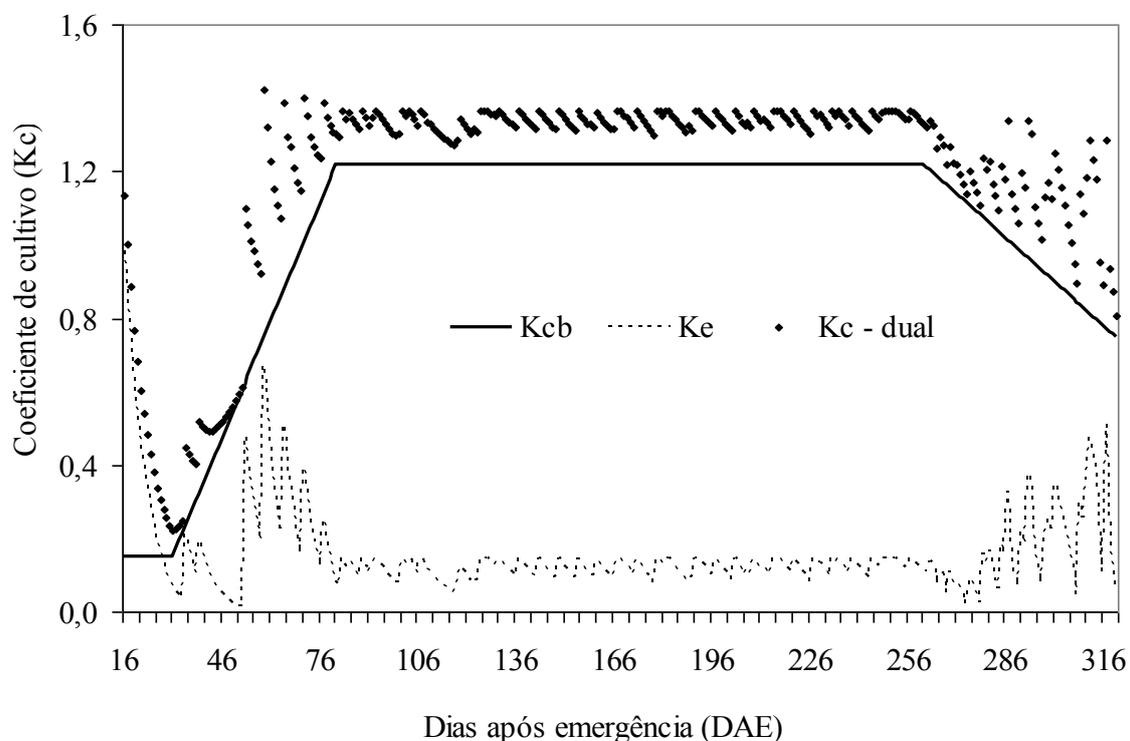


Figura 2. Distribuição temporal do coeficiente de cultivo basal ( $K_{cb}$ ), coeficiente de evaporação de água do solo ( $K_e$ ) e coeficiente dual ( $K_c$  - dual) da cana-de-açúcar cultivada em região tropical

Estes resultados estão consistentes com aqueles mencionados no Boletim 56 da FAO (Allen et al. 1998), bem como por López-Urrea et al. (2009) quando determinaram os coeficientes simples e dual da cebola cultivada em condições semiárida na Espanha.

Os valores da média±desvio padrão do  $K_{cb}$ ,  $K_e$  e do  $K_c$ -dual foram, respectivamente,  $0,99\pm 0,32$ ;  $0,15\pm 0,12$  e  $1,14\pm 0,26$ . Portanto, a menor contribuição para a composição  $K_c$  – dual é da evaporação do solo em face da densa cobertura foliar da planta, enquanto a componente da transpiração representa mais 80% do  $K_c$  – dual.

A evaporação de água do solo durante todo o ciclo da cultura foi de 249,2 mm, sendo 57 mm na fase inicial, 52,2 mm na fase de desenvolvimento da cultura, 99,3 mm na fase média e de 40,7 mm na fase final. O maior valor acumulado da evaporação foi na fase média em face do seu tamanho (180 dias), entretanto, a evaporação média diária foi a menor dentre todas as fases, de apenas  $0,55 \text{ mm d}^{-1}$ . Isso é facilmente percebido na Figura 2, onde são exibidos os menores valores do  $K_e$  justamente nessa fase. Pela mesma razão, a fase inicial apresentou uma evaporação acumulada de 57 mm, no período de 30 dias, sendo a maior média diária dentre todas as fases ( $1,9 \text{ mm d}^{-1}$ ). A fase de desenvolvimento apresentou o total acumulado de 52, 2 mm e média diária de  $1,04 \text{ mm d}^{-1}$ , enquanto que o total acumulado na fase final foi de 40,7 mm e a média diária foi de  $0,68 \text{ mm d}^{-1}$ . Portanto, a evaporação do solo e a transpiração da cultura da cana-de-açúcar representam, respectivamente, 15 e 85% da evapotranspiração total obtida com base no  $K_c$  – dual. Flumignan et al. (2011) quando mediram os componentes da evapotranspiração e o coeficiente de cultivo dual durante o ciclo produtivo do café no Brasil encontraram que a evaporação e a transpiração dessa cultura representam, respectivamente, 35 e 65% da evapotranspiração. As discrepâncias entre os valores encontrados na presente pesquisa com aqueles obtidos por esses autores são atribuídas à arquitetura foliar da cultura de café que propicia maior exposição do solo ao processo de evaporação durante todo o ciclo produtivo. Além disso, a evaporação do solo sob um dossel ou entre plantas é controlada pela quantidade de energia disponível na superfície do solo. Essa energia é o que resta depois do consumo de energia pela transpiração

(Allen, 2000). Portanto, quando o solo está úmido, a evaporação ocorre em taxa máxima e o  $K_c$  – dual é igual  $K_c$  máximo, definido pela Eq. (6).

A Tabela 3 exhibe os componentes do balanço hídrico no solo durante as quatro fases do ciclo da cultura da cana-de-açúcar, bem como os períodos e o número de dias de cada fase fenológica da cultura. A alta frequência e quantidade de irrigação, que durante todo o ciclo da cultura foi de 1.342,2 mm, provocou drenagem elevada de 301,1 mm, que corresponde a 22,4% da irrigação total. Por outro lado, a precipitação total do período representou pouco mais de 1/3 da média climatológica da região (que é de aproximadamente 1500 mm).

Tabela 3. Componentes do balanço hídrico no solo durante as fases do ciclo da cultura da cana-de-açúcar em milímetros

Fases	Data	Dias	Precipitação	Irrigação	Drenagem
Inicial	(10/10 - 08/11)/2009	30	0,0	30,0	13,8
Desenvolvimento	(09/11 - 28/12)/2009	50	12,0	146,9	0,0
Média	29/12/209 - 26/06/2010	180	421,0	932,2	157,5
Final	(27/06 - 25/08/2010)	60	188,0	233,1	129,8
Total	-	320	621,0	1342,2	301,1

No manejo da irrigação usualmente são utilizados para qualquer região os coeficientes de cultivos propostos no Boletim 56 da FAO sem qualquer ajuste às condições climáticas locais. Entretanto, esse procedimento é equivocado porque eles são válidos apenas para climas sub úmidos, caracterizados por umidade relativa mínima diária de  $\approx 45\%$  e moderada velocidade média do vento de  $\approx 2 \text{ m s}^{-1}$  (Allen et al., 1998). Assim, os coeficientes de cultivo simples e basal apresentados na Tabela 1 foram ajustados às condições climáticas da área experimental desta pesquisa, utilizando-se as Eqs. (7 e 8) na determinação do  $K_c$  (médio) e  $K_c$  (final), conforme recomendado pelo Boletim 56 da FAO. Com base nesses procedimentos, a Tabela 4 exhibe os valores

médios dos coeficientes de cultivo simples, dual e obtido pelo método do balanço hídrico no solo, bem com o valor médio do índice da área foliar (IAF) para cada fase do ciclo da cana-de-açúcar.

Tabela 4. Valores médios dos coeficientes de cultivo ajustados às condições climáticas da região durante as fases do ciclo da cultura da cana-de-açúcar e IAF = índice de área foliar

Fases	Kc – simples aj	Kc - BH	Kc-dual	IAF
Inicial	0,40	0,56	0,56	-
Desenvolvimento	0,85	0,65	0,87	1,50
Média	1,31	1,43	1,34	4,86
Final	1,06	1,32	1,16	5,62
Média	0,90	0,99	0,98	3,99

Os coeficientes de cultivo simples, com base no balanço hídrico e dual apresentaram valores semelhantes, especialmente os  $K_c$ - dual e  $K_c$ - BH; enquanto o  $K_c$ - simples ajustado e o  $K_c$ -BH apresentaram uma diferença acentuada, de aproximadamente 10%. Excluindo-se a fase intermediária de desenvolvimento, esses valores foram mínimos nas fases inicial e final; enquanto na fase média eles foram máximos e, portanto, seguindo o curso sazonal do IAF. Na construção da curva do  $K_c$  são utilizados apenas os  $K_c$ 's das fases inicial, média e final (Allen et al., 1998). Os valores do IAF foram derivados a partir do modelo apresentado por Gouveia Neto (2009). A maior diferença entre os  $K_c$  – simples ajustado e  $K_c$  - BH ocorreu na fase final, cuja diferença é em torno de 20%. Tal diferença é bastante significativa nessa fase de crescimento da cultura, isso pode implicar numa diferença apreciável do volume de água aplicado no manejo da irrigação da mesma. Por outro lado, o  $K_c$ -dual se manteve bastante próximo da  $K_c$  - BH em todas as fases da cultura, indicando que ele pode ser utilizado com precisão na estimativa das necessidades hídricas da cultura. Efetivamente, os valores do  $K_c$  - BH são significativamente maiores do que do  $K_c$  –

simples (FAO/56) praticamente em todas as fases de desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar. Este resultado é consistente com aqueles apresentados no Boletim 56 da FAO, pois o coeficiente de cultivo é maior em condições climáticas mais áridas e com altos valores de velocidade do vento do que em climas mais úmidos e com baixa velocidade do vento (Allen et al., 1998).

A Figura 3 exibe o curso sazonal do coeficiente de cultivo simples ajustado às condições climáticas da região e o coeficiente de cultivo com base no balanço hídrico no solo da cana-de-açúcar. A subestimativa do  $K_c$  – simples ajustado às condições climáticas locais em relação ao  $K_c$  – BH se torna ainda mais evidente, principalmente entre os dias após emergência (DAE) 88 e 262, que corresponde à fase média da cultura. Nessa fase, a média do  $K_c$  simples ajustado foi de 1,31, enquanto o valor correspondente para o  $K_c$  não ajustado às condições climáticas locais foi de 1,25 (Tabela 1). Na fase final da cultura o  $K_c$  não ajustado é significativamente inferior ao valor ajustado às condições climáticas locais, cuja diferença é aproximadamente de 30%. As diferenças entre os valores dos  $K_c$ 's ajustados e não ajustados às condições climáticas locais também levam a erros apreciáveis no manejo da irrigação de qualquer cultura.

O método do balanço hídrico no solo foi utilizado na determinação da evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar, cuja variação sazonal e oferta hídrica (precipitação + irrigação) são apresentadas na Figura 4. A evapotranspiração (ET) foi determinada em intervalos de 3-7 dias de forma que a precipitação e/ou irrigação fosse contemplada no cálculo da ET nesse período. Procedimento semelhante foi utilizado por Azevedo et al. (2003) quando determinou a evapotranspiração da mangueira na região do sub médio Rio São Francisco com base no método do balanço hídrico no solo. Os menores valores da ET ocorreram no período em que não houve irrigação e máximos nos períodos de maior frequência e intensidade de irrigação e precipitação. Dessa forma,

muito embora a ET da cana-de-açúcar seja fortemente influenciada pelo total de água aplicado à cultura, ela também depende da demanda atmosférica e da área foliar.

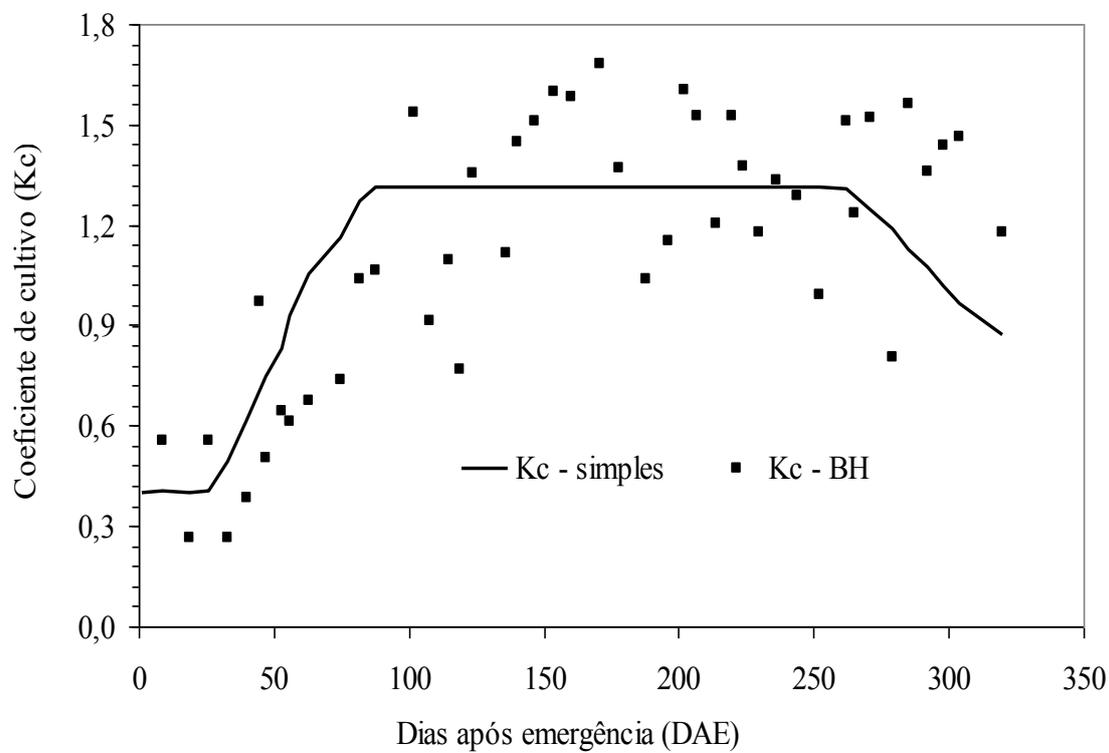


Figura 3. Coeficiente de cultivo simples ajustado às condições climáticas da região ( $K_c$  - simples) e o coeficiente de cultivo com base no balanço hídrico no solo ( $K_c$  - BH) da cana-de-açúcar

A influência da área foliar sobre a evapotranspiração da cultura é exibida na Figura 5. O relacionamento entre o índice de área foliar (IAF) e a evapotranspiração da cultura apresentou um coeficiente de correlação de  $r = 0,63$  (Figura 5A), que é baixo mas é estatisticamente significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste t-Student. O IAF superestima a evapotranspiração da cultura a partir do DAE 230, justamente na fase final da cultura. Entretanto, o relacionamento entre essas variáveis é muito bom entre os DAEs 60-230, apresentando coeficiente de correlação de 0,83.

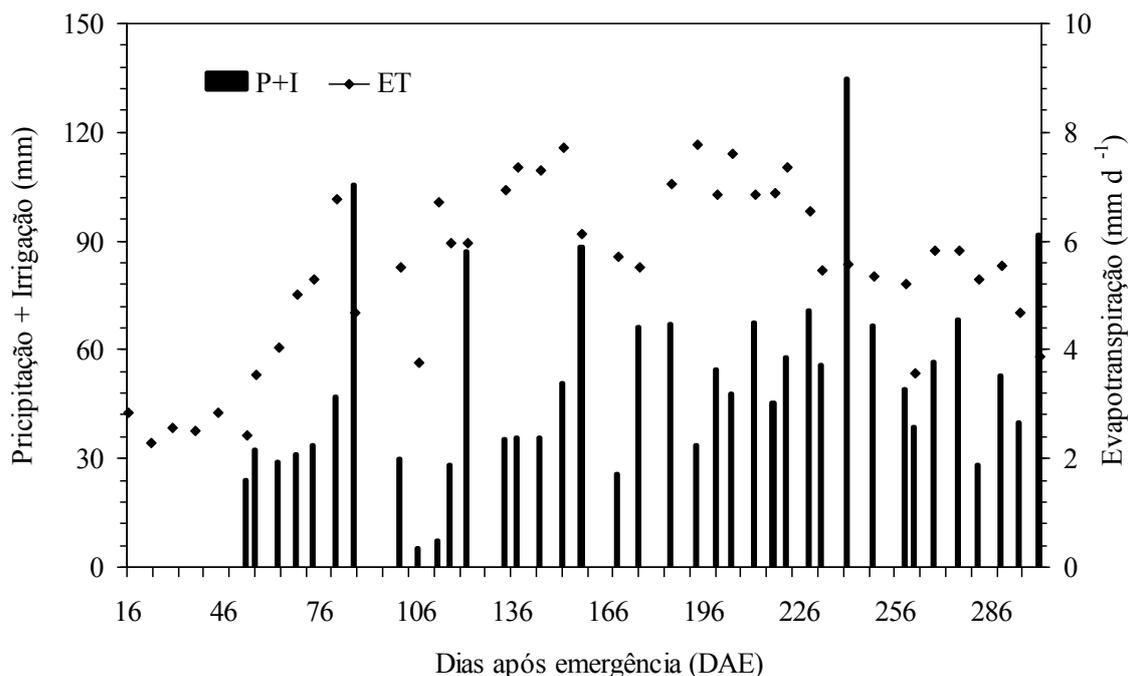


Figura 4. Média semanal da evapotranspiração da cana-de-açúcar obtida com base no balanço hídrico no solo e os valores da precipitação + irrigação na parcela experimental

O curso sazonal da umidade do solo e da drenagem de água no solo durante o período experimental com a cana-de-açúcar é apresentado na Figura 6. A umidade do solo apresenta comportamento crescente ao longo do ciclo da cultura, variando de 41,3 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> no início do ciclo, quando não houve irrigação, a 155,6 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>, no final no ciclo, após o solo ter recebido grande quantidade de água por irrigação e precipitação; enquanto a umidade média e o desvio padrão durante o período experimental foram de 93,6±23,8 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>. As altas lâminas e frequências das irrigações, acrescidas pela precipitação, provocaram, além do aumento da umidade do solo, altas taxas de drenagem que totalizaram 301,1 mm no final do experimento.

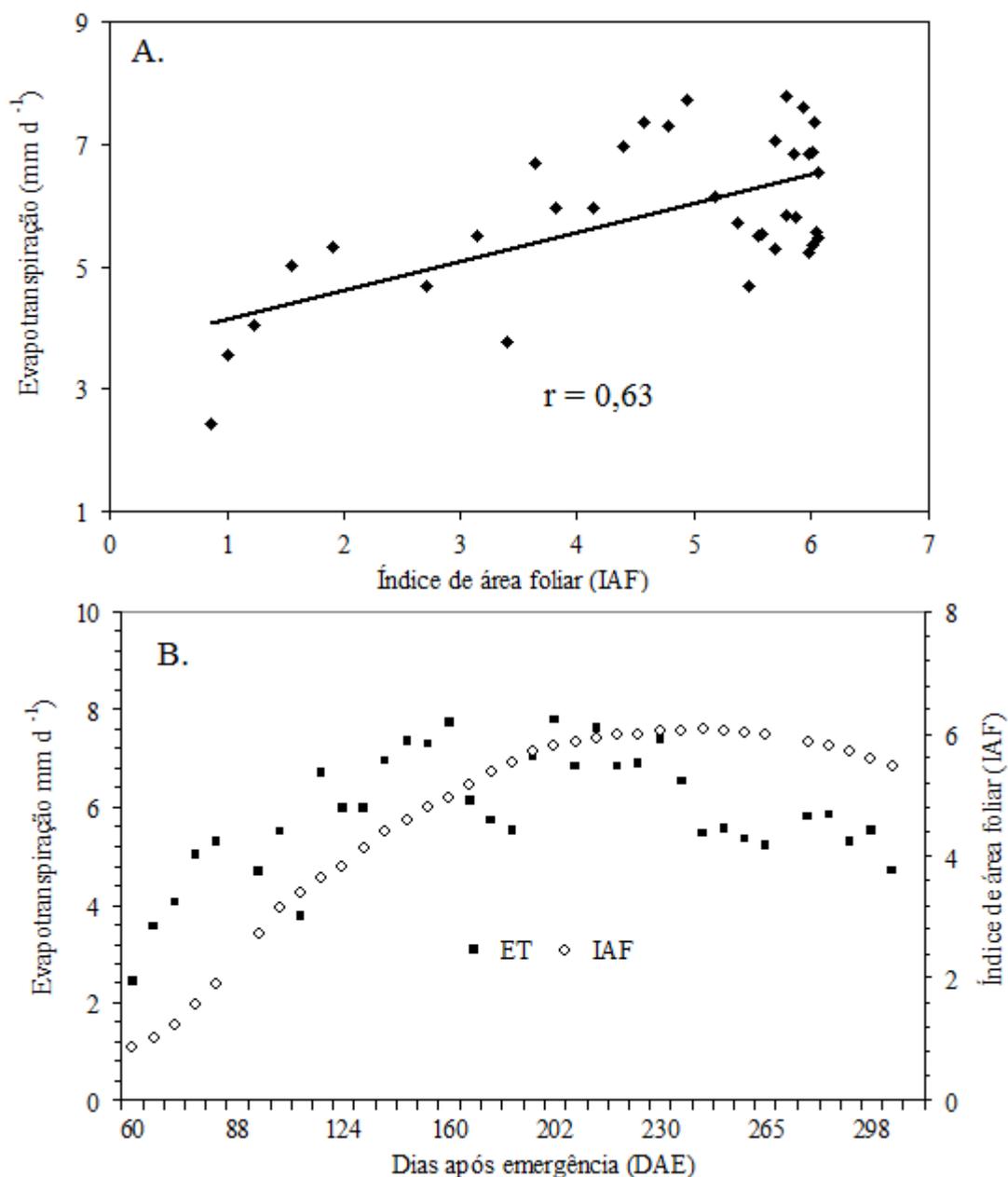


Figura 5. Relacionamento entre evapotranspiração obtida pelo balanço hídrico no solo e o índice de área foliar (IAF) da cana-de-açúcar. O índice de área foliar foi obtido a partir de modelo estabelecido por Gouveia Neto (2009) para o tratamento 100% da  $ET_0$  para a cultura cultivada na mesma região desta pesquisa.

A média e o desvio padrão da drenagem foram de  $8,51 \pm 13,8$  mm. A baixa média da drenagem em relação ao seu desvio padrão é explicada pelo fato que a drenagem

apenas começou ocorrer a partir do DAE 200, atingindo o seu valor máximo de 57,5 mm no DAE 234. Os valores médios e acumulados da evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar, obtidos com base no coeficiente de cultivo simples ajustado às condições climáticas da região ET ( $K_c$  - simples), coeficiente de cultivo com base no balanço hídrico no solo ET ( $K_c$  - BH) e no coeficiente de cultivo dual ET ( $K_c$  - dual) são apresentados na Tabela 5. No cálculo da evapotranspiração da cultura com base no coeficiente de cultivo dual se obteve o coeficiente de estresse hídrico igual a 1.

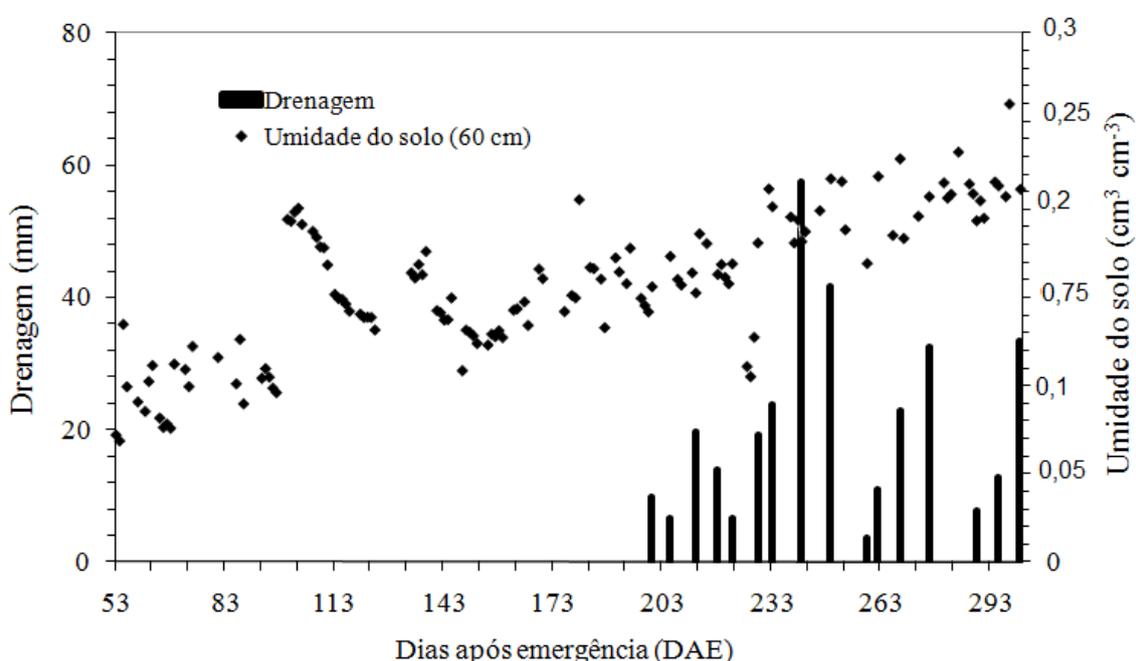


Figura 6. Curso sazonal da umidade do solo (losangos) e da drenagem de água no solo (barras verticais) durante o período experimental com a cana-de-açúcar

Esse coeficiente, que varia entre 0 e 1, reduz o valor da  $K_{cb}$  quando o conteúdo médio de água do solo na zona de raiz não é suficiente para manter a completa transpiração das plantas. Os efeitos do estresse hídrico na ET da cultura são contabilizados através da multiplicação do coeficiente de cultivo pelo coeficiente de estresse hídrico. Portanto, a evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar pelo método do balanço hídrico não necessitou de nenhum ajuste, haja vista que a cultura

não passou por estresse hídrico em nenhum momento do seu ciclo de produção. Isso era esperado, em face das altas lâminas e frequências das irrigações, porém é necessário constatar a ausência de estresse hídrico para se obter valores precisos do  $K_c$ . Tal como ocorreu na análise dos  $K_c$ 's, os valores da evapotranspiração da cultura (acumulados e médios) pelas três formas de cálculo são semelhantes, em média para todo o ciclo.

Tabela 5. Valores médios ( $\text{mm d}^{-1}$ ) e acumulados (mm) da evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar com base no coeficiente de cultivo simples ajustado às condições climáticas da região ET ( $K_c$  - simples), coeficiente de cultivo obtido com base no balanço hídrico no solo ET ( $K_c$  - BH) e no coeficiente de cultivo dual ET ( $K_c$  - dual)

Fases	ET ( $K_c$ - simples)		ET ( $K_c$ - BH)		ET ( $K_c$ - dual)	
	Médio	Acumulado	Médio	Acumulado	Médio	Acumulado
Inicial	1,97	59,12	2,60	77,92	2,60	77,92
Desenvolvimento	4,42	220,97	3,33	166,36	4,53	226,30
Média	6,10	1097,79	6,38	1148,92	6,23	1122,10
Final	4,16	249,38	4,89	293,55	4,54	272,32
Total	-	1627,26	-	1686,75	-	1698,64
Média	4,16	-	4,30	-	4,47	-

Os valores médios da ET com base no  $K_c$  - simples,  $K_c$  - BH e  $K_c$  - dual são, respectivamente, 4,16; 4,30 e 4,47  $\text{mm d}^{-1}$ ; enquanto os valores acumulados da ET com base no  $K_c$  - simples,  $K_c$  - BH e  $K_c$  - dual são, respectivamente, 1.627,26; 1.686,75 e 1.698,64 mm. Enquanto o erro relativo entre os valores da ET com base no  $K_c$  - BH e  $K_c$  - dual é inferior a 1%. Já o erro relativo entre os valores da ET com base no  $K_c$  - simples e  $K_c$  - BH é aproximadamente 10%. Em todos os casos, os valores da ET média e acumulada são sempre maiores na fase média e menor nas fases inicial e final, exceto a ET acumulada da fase de desenvolvimento é 10 dias menor do que a fase final da cultura.

A diferença entre os valores da ET acumulada durante o ciclo da cultura com base no  $K_c$  - BH e  $K_c$  - dual é de apenas 11,9 mm e entre os  $K_c$ 's médios 0,17. Por outro lado, a diferença entre os valores da ET acumulada com base no  $K_c$  - simples ajustado e  $K_c$  - BH é de 59,5 mm e entre os valores médios são de 0,14 (Tabela 5). Portanto, este resultado constata mais uma vez a eficiência da metodologia do  $K_c$  dual no cálculo das necessidades hídricas das culturas. Nesse particular, Moreira (2002) argumenta que o  $K_c$  dual propicia condições de ajustes mais precisos no cálculo da evapotranspiração das culturas, principalmente na fase inicial, quando elas expõem o solo por um período maior.

As variações das médias semanais da evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar obtidas com base no coeficiente de cultivo simples, dual e com base no balanço hídrico no solo e seus respectivos desvios padrão são exibidos na Figura 7. Devido à dispersão dos dados e a influência do frequente umedecimento da superfície do solo através de irrigação da cultura, os valores da ET calculados com base nos três  $K_c$ 's são exibidos em médias de 7 dias.

Os menores desvios padrão da ET foram obtidos com base no  $K_c$ -BH (Figura 7B), e os maiores desvios foram encontrados com a utilização do  $K_c$ -dual, atingindo 1,62 mm no DAE 234. A curva da evapotranspiração com base no  $K_c$  - BH (Figura 7B) descreve de forma mais homogênea o ciclo da cultura do que as curvas com  $K_c$  - simples ajustado (Figura 7A) e  $K_c$  - dual (Figura 7C). Na Figura 7A e 7C observa-se uma inflexão da curva da evapotranspiração em torno do DAE 150, devido a redução da demanda evaporativa durante o período de chuvas na região. De forma geral, a evapotranspiração aumenta rapidamente a partir do início do ciclo da cultura até atingir a fase média, como resultado do aumento do dossel da planta, e em seguida decresce em função da redução da frequência da irrigação e do declínio da demanda evaporativa.

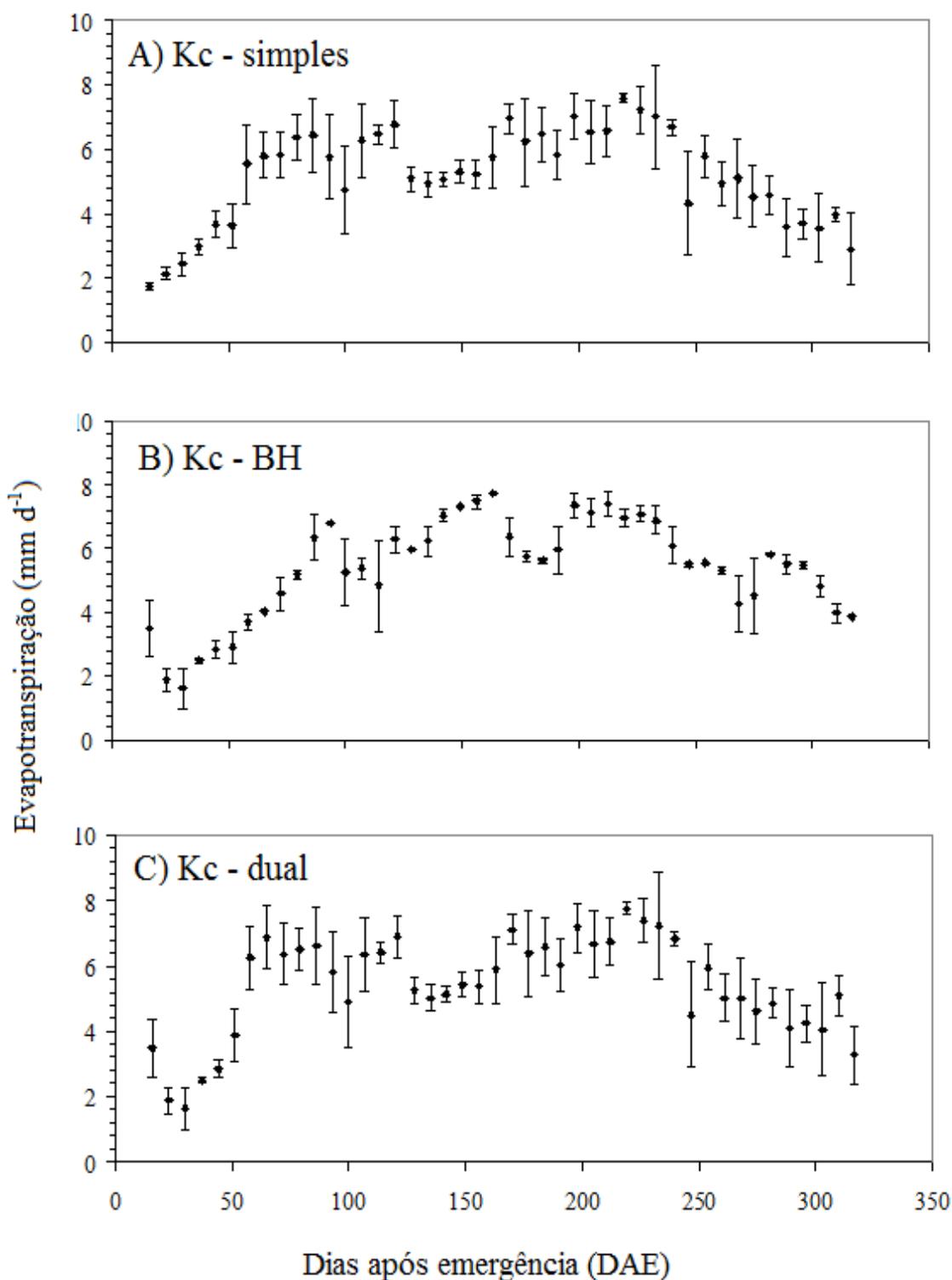


Figura 7. Variação sazonal da evapotranspiração e seus respectivos desvios padrão da cana-de-açúcar obtido com base no coeficiente de cultivo simples ( $K_c$  – simples), no balanço hídrico no solo ( $K_c$  – BH) e no dual ( $K_c$  – dual), para média de 7 dias

O curso sazonal da evapotranspiração obtida com base no balanço hídrico no solo e coeficiente de cultivo ajustado para cana-de-açúcar nas condições climáticas tropicais é exibido na Figura 8.

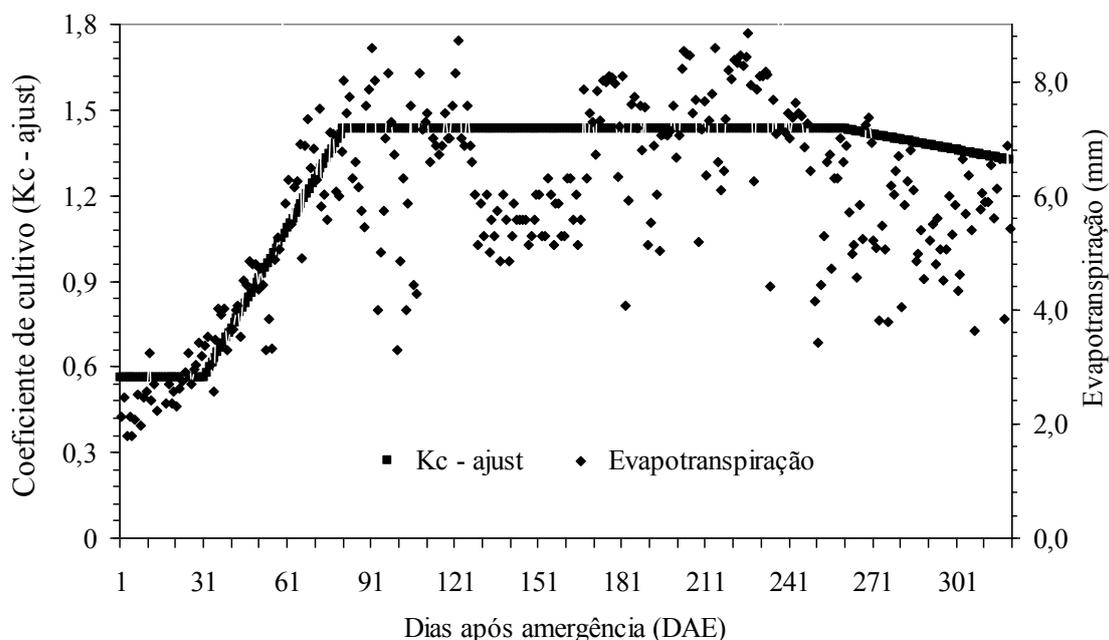


Figura 8. Curso sazonal da evapotranspiração obtida com base no balanço hídrico no solo (losangos) e coeficiente de cultivo ajustado (linha espessa) da cana-de-açúcar as condições climáticas tropicais

Os valores da ET da cultura ao longo do ciclo foram bastante dispersos, porém consistentes com a curva do  $K_c$  ajustada. Os valores do  $K_c$  inicial (0,56),  $K_c$  médio (1,43) e  $K_c$  final (1,32) foram utilizados para construção da curva do  $K_c$  da região, obtidos pela Eq. (7). A curva do  $K_c$  ajustado à região produziu a evapotranspiração média de  $5,9 \text{ mm d}^{-1}$  e desvio padrão de 1,68; enquanto o  $K_c$  médio foi de 1,26 e o desvio padrão de 0,29. Esses valores são significativamente diferentes daqueles propostos pelo FAO para a cultura da cana-de-açúcar cultivada em climas sub úmidos. Os resultados são consistentes com aqueles obtidos por Inman-Bamber & McGlinchey (2003) quando determinaram o coeficiente de cultivo e a eficiência do uso de água da

cana-de-açúcar cultivada na Austrália e Suíça usando o método do balanço de energia baseado na razão de Bowen para estimar a evapotranspiração da cultura. Esses autores encontraram o coeficiente de cultivo da cana-de-açúcar variando entre 0,5 e 1,5, sendo o  $K_c$  médio de 1,23; enquanto a evapotranspiração e o desvio padrão foram de  $5,48 \pm 0,13$ . Os valores de  $K_c$  e ET da cana-de-açúcar encontrados para esses países são levemente inferiores daqueles obtidos nesta pesquisa, provavelmente pela diferença climática das duas regiões.

O sumário das estatísticas da evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar com base no coeficiente de cultivo simples ajustado às condições climáticas da região e o coeficiente de cultivo dual comparadas com a evapotranspiração obtida com base no balanço hídrico no solo é apresentado na Tabela 6.

Tabela 6. Sumário das estatísticas da evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar com base no coeficiente de cultivo simples ajustado às condições climáticas da região ET ( $K_c$  – simples) e o coeficiente de cultivo dual ET ( $K_c$  - dual) comparadas com a evapotranspiração obtida com base no balanço hídrico no solo ET ( $K_c$  - BH). EMD ( $\text{mm d}^{-1}$ ) = erro médio dos desvios, RQMDN (%) = raiz quadrada do quadrado médio do erro normalizado e r = coeficiente de correlação

Coeficiente de cultivo	EMD	RQMDM	r
$K_c$ - Simples	-0,16	0,32	0,63
$K_c$ - Dual	0,04	0,26	0,64

Os valores do erro médio dos desvios (EDM) para o  $K_c$  – simples foi negativo , indicando que a evapotranspiração para este  $K_c$ , subestima a evapotranspiração pelo método do balanço hídrico. Por outro lado, o  $K_c$  – dual foi positivo, indicando que a

evapotranspiração com o  $K_c$  – dual apresenta uma pequena superestimativa da evapotranspiração com o balanço hídrico. Esses valores são consistentes porque, de fato, a evapotranspiração pelo método do balanço hídrico é maior do a obtida com o  $K_c$ -simples em praticamente todas as fases da cultura, porém os valores médios e acumulados do  $K_c$ -dual são levemente maiores que a evapotranspiração com base no balanço hídrico.

Os valores da raiz quadrada do quadrado médio do erro normalizado (RQMDN) da evapotranspiração com base no  $K_c$  – simples e  $K_c$  –dual foram 32% e 26%; com coeficiente de correlação relativamente baixo, variando entre 0,63-0,64, porém, estatisticamente significativos ao nível de 5% de probabilidade pelo teste t-Student. A alta percentagem da RQMDN associada com a pouca explicação do coeficiente de determinação ( $r^2$ ) entre as variáveis analisadas permitem afirmar que o coeficiente de cultivo proposto pela FAO para a cana-de-açúcar não é apropriado para regiões tropicais. Os resultados deste trabalho podem ser utilizado em outras regiões tropicais já que o  $K_c$  varia predominantemente com as características das culturas e apenas de forma limitada com o clima. Isso permite, portanto, a transferência dos valores do  $K_c$  entre regiões (Allen et al., 1998).

## 5. CONCLUSÕES

1. A evaporação do solo e a transpiração da cultura da cana-de-açúcar nas condições estudadas representam, respectivamente, 15 e 85% da evapotranspiração total;
2. Os valores recomendados para a construção da curva do coeficiente de cultivo da cana-de-açúcar cultivada em climas tropicais são os seguintes:  $K_c$  (inicial) = 0,56;  $K_c$  (médio) = 1,43 e  $K_c$  (final) = 1,32;
3. A metodologia do  $K_{c\text{-dual}}$  pode ser utilizado com melhor precisão na estimativa das necessidades hídricas da cultura da cana-de-açúcar em regiões tropicais;
4. Os valores do coeficiente de cultivo propostos pela FAO para a cultura da cana-de-açúcar não são apropriados para regiões tropicais.
5. A evapotranspiração cresce da fase inicial até a fase média, decrescendo na fase final, em função ao crescimento vegetativo da planta.
6. A utilização do  $K_c$  calculado para região pode reduzir o consumo de água utilizado na irrigação e, conseqüentemente, na diminuição dos custos de produção e no uso eficiente da água.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, R. G.; Pereira, L. S., Raes, D.; Smith, M. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome, 300 p, 1998.
- Allen, R. G. Using the FAO-56 dual crop coefficient method over an irrigated region as part of an evapotranspiration intercomparison study. *Journal of Hydrology*, v.229, n.1, p. 27-41, 2000.
- Allen, R. G.; Clemmens, A. J.; Burt, C. M.; Solomon, K.; O'Halloran, T. Prediction accuracy for project-wide evapo-transpiration using crop coefficients and reference evapotranspiration. *Journal of Irrigation Drainage Engineering*, v.13, n.1, 2005.
- Alves, M. E. B. Disponibilidade e demanda hídrica na produtividade da cultura do eucalipto. Viçosa: UFV, 2009. 136p. Tese Doutorado
- Andrade, J. G. Perdas de água por evaporação de um solo cultivado com milho nos sistemas de plantio direto e convencional. Santa Maria: UFSM, 2008. 92p. Dissertação Mestrado.
- Andreatta, J. A. Determinação da razão entre a evapotranspiração máxima de cultivares de milho (*Zea mays* L.) e a evapotranspiração potencial. São Paulo: UNESP, 1990. 94 p. Dissertação de mestrado.
- Angelocci, L. R. Necessidades hídricas de frutíferas. In: Seminário sobre água na produção de frutíferas, Pelotas, 2000. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2000. p. 6-7. (Embrapa Clima Temperado. Documentos 68).
- Antonino, A. C. D.; Sampaio, E. V. S. B.; Dallolio, A.; Salcedo, I. H. Balanço hídrico em solo com cultivos de subsistência no semi-árido do Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.4, n.1, p.29-34, 2000.

- Azevedo, P. V.; Silva, B. B.; Silva, V. P. R. Water requirements of irrigated mango orchards in Northeast Brazil. *Agricultural Water Management*, v.58, n.1, p.241-254, 2003.
- Azevedo, P. V.; Souza, C. B.; Silva, B. B.; Silva, V. P. R. Water requirements of pineapple crop grown in a tropical environment, Brazil. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v. 88, n. 1, p. 201-208, 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.
- 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 de Solo*, v.33, n.1, p.295-303, 2009.
- Camargo, A. P. Balanço hídrico, florescimento e necessidade de água para o cafeeiro. In: *Simpósio sobre o Manejo de água na agricultura*, Campinas, 1987. *Anais: Campinas, Fundação Cargil*, p.53-90, 1987.
- Campos, J. H. B. C.; Silva, V. P. R.; Azevedo, P. V.; Borges, C. J. R.; Soares, J. M.; Moura, M. S. B.; Silva, B. B. Evapotranspiração e produtividade da mangueira sob diferentes tratamentos de irrigação. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 12, p. 150-156, 2007.
- Campos, J. H. B. C.; Silva, V. P. R., Azevedo, P. V.; Borges, C. J. R. Evapotranspiração e produtividade da mangueira sob diferentes tratamentos de irrigação. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.12, n.2, p.150–156, 2008.

- 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*, v.4, n.1, p.23-28, 2000.
- Cruz, A. C. R.; Libardi, P. L.; Carvalho, L. A.; Rocha, G. C. Balanço de água no volume de solo explorado pelo sistema radicular de uma planta de citros. *Revista Brasileira de Ciência de Solo*, v.29, n.1, p.1-10, 2005.
- Doorenbos, J.; Pruitt, W. O. Crop water requirements. FAO Irrigation Drainage. Paper No. 24, FAO, Rome, Italy, 1977.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço Energético Nacional 2008: Ano base 2007 – Rio de Janeiro: EPE, 244p, 2008.
- Farias, C. H. A. Otimização do uso da água e do zinco na cana-de-açúcar em tabuleiro costeiro paraibano. Campina Grande: UFCG, 2006. 142p. Tese Doutorado.
- Flumignan, D. L.; Faria, R. T.; Prete, C. E. C. Evapotranspiration components and dual crop coefficients of coffee trees during crop production. *Agricultural Water Management*, 98, v.1, p.791-800, 2011.
- Gava, G. J. C.; Silva, M. A.; Silva, R. C.; Jerônimo, E. M.; Cruz, J. C. S.; Kolln, O. T. Produtividade de três cultivares de cana-de-açúcar sob manejos de sequeiro e irrigado por gotejamento. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.15, n.3, p.250-255, 2011.
- Gouveia Neto, G.C. Crescimento da cana-de-açúcar sob irrigação e parcelamento da adubação nitrogenada. Campina Grande: UFCG, 2009. 80p. Dissertação Mestrado.
- Hillel, D. Solo e água: fenômenos e princípios físicos. Porto Alegre: UFRGS, Departamento de solos, 231 p, 1970.
- Inman-Bamber, N. G.; Muchow, R. C.; Robertson, M. J. Dry partitioning of sugarcane in Australia and South Africa. *Field Crops Research*, v.76, p.71-84, 2002.

- Inman-Bamber, N. G.; McGlinchey, M. G. Crop coefficients and water-use estimates for sugarcane based on long-term Bowen ratio energy balance measurements. *Field Crops Research*, v.83, n. 1, p.125-138, 2003.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – Produção Agrícola 2007: culturas perenes. Disponível na web site: [www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br). Acesso em 17/06/2009.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – Produção Agrícola 2010: Disponível na web site: [www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br). Acesso em 17/06/2011.
- Kang, S.; Gu, B.; Du, T.; Zhang, J. Crop coefficient and ratio of transpiration to evapotranspiration of winter wheat and maize in a semi-humid region. *Agricultural Water Management*, v.59, n.1, p.239-254, 2003.
- Karam, F.; Lahoud, R.; Masaad, R.; Daccache, A.; Mounzer, O.; Rouphael, Y. Water use and lint yield response of drip irrigated cotton to the length of irrigation season. *Agricultural Water Management*, v.6, n.1, p.287-295, 2006.
- Keating, B. A.; Robertson, M. J.; Muchow, R. C.; Huth, N. I. Modelling sugarcane production systems I: development and performance of the sugarcane module. *Field Crops Research*, v.48, n.1, p. 27-36, 1999.
- Klar, A. E. A água no sistema solo-planta-atmosfera. São Paulo: Nobel Editora, 1984.
- Klar, A. E. Irrigação frequência e quantidade de aplicação. 1. Ed. São Paulo: Nobel Editora, 408 p, 1991.
- Libardi, P. L. Dinâmica da água no solo. Piracicaba: ESALQ – Departamento de Física e Meteorologia, 497 p, 1995.
- Liu, C.; Zhang, X.; Zhang, Y. Determination of daily evaporation and evapotranspiration of winter wheat and maize by large-scale weighing lysimeter and micro-lysimeter. *Agricultural Forest Meteorology*, v.111, n.1, p.109-120, 2002.

- Liu, Y.; Luo, Y. L. A consolidated evaluation of the FAO-56 dual crop coefficient approach using the lysimeter data in the North China Plain. *Agricultural Water Management*, v.97, n.1, p. 31-40, 2010.
- López-Urrea, R.; Olalla, F. M. S.; López-Fuster, A. M. Single and dual crop coefficients and water requirements for onion (*Allium cepa* L.) under semiarid conditions. *Agricultural Water Management*, v.96, p.1031–1036, 2009.
- Matzenauer, R. Evapotranspiração de plantas cultivadas e coeficiente de cultura. In: BERGAMASCHI, H. *Agrometeorologia aplicada a irrigação*. 2 ed. Porto Alegre: Ed. UFRGS, p. 33-47, 1999.
- Medina, J. L.; Camargo, E.; Reza, J.; López, R.; Roldán, J. Determination and analysis of regional evapotranspiration in southern Spain using remote sensing and GIS. *Physics and Chemistry of the Earth*, v.23, n.4, p.427-432, 1998.
- Moreira, H. J. C. Sistema agroclimatológico para o acompanhamento das culturas irrigadas: manual prático para o manejo da irrigação. Brasília: Secretaria Nacional de Irrigação, 90p, 1993.
- Moreira, H. M. Desempenho de métodos de manejo de irrigação para a cultura do tomateiro cultivado em campo e em casa de vegetação. Viçosa: UFV, 2002. 97p, Dissertação Mestrado.
- Moura, M. V. P. S.; Farias, C. H. A.; Azevedo, C. A. V.; Dantas Neto, J.; Azevedo, H. M.; Pordeus, R. V. Doses de adubação nitrogenada e potássica em cobertura na cultura da cana-de-açúcar, primeira soca, com e sem irrigação. *Ciência Agrotécnica*, v.29, n.1, p.753-760, 2005.
- Moura, M.S.B. Consumo hídrico, produtividade e qualidade do fruto da goiabeira irrigada na região do submédio São Francisco. Campina Grande: UFCG, 2005. 122p. Tese de doutorado.

- Oliveira, E. P.; Sobrinho, J. B. S.; Negreiros, J. C.; Amazonas, L.; Almeida, M. B. A.;  
Silveira, P. S.; Andrade, R. A.; Piffer, T. R. O.; Teixeira, W. S. Acompanhamento da  
safra brasileira cana-de-açúcar safra 2007/2008, segundo levantamento, agosto/2007  
- Companhia Nacional de Abastecimento. Brasília: Conab, 2007. 12p.
- Ometto, J. C. Parâmetros meteorológicos e a cultura da cana-de-açúcar. Piracicaba:  
ESALQ, 1980. 17p.
- Pereira, A. R., Villa Nova. N. A.; SEDIYMA, B. C. Evapotranspiração. Piracicaba:  
FEALQ, 183p. 1997.
- Ramesh, P.; Mahadevaswamy, M. Effect of formative phase drought on different  
classes of shoots, shoot mortality, cane attributes, yield and quality of four sugarcane  
cultivars. *Journal of Agronomy and Crop Science*, v.185, p.249-258, 2000.
- Ramos, C. M. C. Distribuição do sistema radicular e consumo de água da bananeira  
irrigada por microaspersão. Viçosa: UFV, 2001. 62 p. Dissertação de Mestrado.
- Silva, V. P. R. Estimativa das necessidades hídricas da mangueira. Campina Grande:  
UFCG, 2000. 129p. Tese de doutorado.
- Silva, V. P. R.; Azevedo, P. V.; Silva, B. B.; Bassoi, L. H. ; Teixeira, A. H. C. ; Soares,  
José Monteiro ; Silva, J. A. M. E. Estimativa da evapotranspiração da mangueira  
com base no balanço hídrico do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e  
Ambiental*, Campina Grande, v.5, n.3, p.456-462, 2001.
- Silva, V. P. R. On climate variability in Northeast of Brazil. *Journal of Arid  
Environments*, v.58, n.4, p.575-596, 2004.
- Silva, M. A.; Silva, J. A. G.; Enciso, J.; Sharma, V.; Jifon, J. Yield components as  
indicators of drought tolerance of sugarcane. *Scientia Agricola*, v.65, p.620-627,  
2008.

- Silva, V. P. R.; Campos, J. H. B. C.; Azevedo, P. V. Water-use efficiency and evapotranspiration of mango orchard grown in northeastern region of Brazil. *Scientia Horticulturae*, v.102, n.1, p. 467-472, 2009.
- Silva, V. P. R.; Silva, R. A.; Cavalcanti, E. P.; Braga, C. C.; Singh, V. P.; Pereira, E. R. R. Trends in solar radiation in NCEP/NCAR database and measurements in northeastern Brazil. *Solar Energy*, v.84, n.1, p.1852-1862, 2010.
- Smit, M. A.; Singels, A. The response of sugarcane canopy development to water stress. *Field Crops Research*, v.98, n.1, p.91-97, 2006.
- Sousa, I. F. Manejo de irrigação, consumo hídrico e produtividade do coqueiro ano verde nos tabuleiros costeiros norte do Estado de Sergipe. Campina Grande: UFCG, 2005. 143p. Tese Doutorado
- Souza, I. F.; Silva, V. P. R.; Azevedo, P. V.; Silva, B. B.; Cintra, F. L. D. Estimativa da evapotranspiração do coqueiro irrigado pelo método do balanço hídrico no solo. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Piracicaba, v.14, n.1, p.1-10, 2006.
- Souza, C. B.; Silva, B. B.; Azevedo, P. V.; Silva, V. P. R. Fluxos de energia e desenvolvimento da cultura do abacaxizeiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 12, n.1, 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.
- Thorburn, P. J.; Dart, I. K.; Biggs, I. M.; Baillie, C. P.; Smith, M. A.; Keating, B. A. The fate of nitrogen applied to sugarcane by trickle irrigation. *Irrigation Science*, v.22, p.201-209, 2003.
- 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. Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.6, n.1, p.57-62, 2002.

Trivelin, P. C. O.; Vitti, A. C.; Oliveira, M. W.; Gava, G. J. C.; Sarriés, G. A. Utilização de nitrogênio e produtividade da cana-de-açúcar (cana-planta) em solo arenoso com incorporação de resíduos da cultura. Revista Brasileira de Ciência de Solo, v.26, n.1, p.637-646, 2002.

Vitti, A. C.; Trivelin, P. C. O.; Gava, G. J. C.; Penatti, C. P.; Bologna, I. R.; Faroni, C. E.; Franco, H. C. J. Produtividade da cana-de-açúcar relacionada ao nitrogênio residual da adubação e do sistema radicular. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.42, n.1, p.249-256, 2007.

Wei, Y.; Sado, K. Estimation of areal evapotranspiration using Landsat TM data alone. In: 5<sup>th</sup> Asian Conference on remote sensing, Bangalore, India. 1994.

## **ANEXOS**

Anexo I. Valores diários do coeficiente de cultivo dual (Kc – dual) e evapotranspiração da cana-de-açúcar (ETc) de acordo com o dia após corte (DAC) e estágio fenológico

DAC	Estádios	Datas	Kc-dual	ETc	DAC	Estádios	Datas	Kc-dual	ETc
1	INICIAL	10/10/2009	0,15	0,57	39	DESENV.	17/11/2009	0,51	2,37
2	INICIAL	11/10/2009	0,15	0,66	40	DESENV.	18/11/2009	0,49	2,52
3	INICIAL	12/10/2009	0,15	0,48	41	DESENV.	19/11/2009	0,49	2,44
4	INICIAL	13/10/2009	0,15	0,57	42	DESENV.	20/11/2009	0,49	2,58
5	INICIAL	14/10/2009	0,15	0,48	43	DESENV.	21/11/2009	0,49	2,59
6	INICIAL	15/10/2009	0,15	0,56	44	DESENV.	22/11/2009	0,49	2,23
7	INICIAL	16/10/2009	0,15	0,68	45	DESENV.	23/11/2009	0,50	2,83
8	INICIAL	17/10/2009	0,15	0,53	46	DESENV.	24/11/2009	0,52	2,78
9	INICIAL	18/10/2009	0,15	0,66	47	DESENV.	25/11/2009	0,53	3,06
10	INICIAL	19/10/2009	0,15	0,69	48	DESENV.	26/11/2009	0,54	3,03
11	INICIAL	20/10/2009	0,15	0,87	49	DESENV.	27/11/2009	0,56	3,07
12	INICIAL	21/10/2009	0,15	0,65	50	DESENV.	28/11/2009	0,57	2,81
13	INICIAL	22/10/2009	0,15	0,72	51	DESENV.	29/11/2009	0,59	3,08
14	INICIAL	23/10/2009	0,15	0,60	52	DESENV.	30/11/2009	0,61	2,93
15	INICIAL	24/10/2009	0,15	0,59	53	DESENV.	01/12/2009	0,63	2,21
16	INICIAL	25/10/2009	0,15	0,62	54	DESENV.	02/12/2009	0,65	2,60
17	INICIAL	26/10/2009	0,15	0,63	55	DESENV.	03/12/2009	0,67	2,28
18	INICIAL	27/10/2009	0,15	0,72	56	DESENV.	04/12/2009	0,69	3,39
19	INICIAL	28/10/2009	0,15	0,63	57	DESENV.	05/12/2009	0,71	3,70
20	INICIAL	29/10/2009	0,15	0,69	58	DESENV.	06/12/2009	0,73	3,59
21	INICIAL	30/10/2009	0,15	0,62	59	DESENV.	07/12/2009	0,75	6,77
22	INICIAL	31/10/2009	0,15	0,71	60	DESENV.	08/12/2009	0,77	4,25
23	INICIAL	01/11/2009	0,15	0,74	61	DESENV.	09/12/2009	0,79	4,60
24	INICIAL	02/11/2009	0,15	0,78	62	DESENV.	10/12/2009	0,81	4,07
25	INICIAL	03/11/2009	0,15	0,87	63	DESENV.	11/12/2009	0,84	4,60
26	INICIAL	04/11/2009	0,15	0,72	64	DESENV.	12/12/2009	0,86	4,71
27	INICIAL	05/11/2009	0,15	0,80	65	DESENV.	13/12/2009	0,88	5,27
28	INICIAL	06/11/2009	0,15	0,81	66	DESENV.	14/12/2009	0,90	3,78
29	INICIAL	07/11/2009	0,15	0,92	67	DESENV.	15/12/2009	0,94	5,47
30	INICIAL	08/11/2009	0,15	0,86	68	DESENV.	16/12/2009	0,96	5,86
31	DESENV.	09/11/2009	0,15	0,90	69	DESENV.	17/12/2009	0,98	5,18
32	DESENV.	10/11/2009	0,17	1,05	70	DESENV.	18/12/2009	1,00	5,48
33	DESENV.	11/11/2009	0,19	0,98	71	DESENV.	19/12/2009	1,01	5,07
34	DESENV.	12/11/2009	0,21	0,90	72	DESENV.	20/12/2009	1,03	6,10
35	DESENV.	13/11/2009	0,42	2,30	73	DESENV.	21/12/2009	1,05	4,74
36	DESENV.	14/11/2009	0,40	2,50	74	DESENV.	22/12/2009	1,07	4,94
37	DESENV.	15/11/2009	0,39	2,32	75	DESENV.	23/12/2009	1,09	4,60
38	DESENV.	16/11/2009	0,39	2,30	76	DESENV.	24/12/2009	1,12	5,91

Continuação

Continua

DAC	Estádios	Datas	Kc-dual	ETc	DAC	Estádios	Datas	Kc-dual	ETc
77	DESENV.	25/12/2009	1,14	5,91	115	MÉDIO	01/02/2010	1,25	5,87
78	DESENV.	26/12/2009	1,16	5,09	116	MÉDIO	02/02/2010	1,25	5,98
79	DESENV.	27/12/2009	1,18	5,07	117	MÉDIO	03/02/2010	1,24	6,46
80	DESENV.	28/12/2009	1,20	5,76	118	MÉDIO	04/02/2010	1,26	6,17
81	MÉDIO	29/12/2009	1,22	6,84	119	MÉDIO	05/02/2010	1,26	6,15
82	MÉDIO	30/12/2009	1,22	6,35	120	MÉDIO	06/02/2010	1,25	6,63
83	MÉDIO	31/12/2009	1,22	6,59	121	MÉDIO	07/02/2010	1,25	7,11
84	MÉDIO	01/01/2010	1,22	5,37	122	MÉDIO	08/02/2010	1,24	7,59
85	MÉDIO	02/01/2010	1,25	5,77	123	MÉDIO	09/02/2010	1,27	6,21
86	MÉDIO	03/01/2010	1,25	5,37	124	MÉDIO	10/02/2010	1,26	6,06
87	MÉDIO	04/01/2010	1,25	4,98	125	MÉDIO	11/02/2010	1,26	6,66
88	MÉDIO	05/01/2010	1,24	4,72	126	MÉDIO	12/02/2010	1,27	6,11
89	MÉDIO	06/01/2010	1,24	6,58	127	MÉDIO	13/02/2010	1,34	6,16
90	MÉDIO	07/01/2010	1,24	6,81	128	MÉDIO	14/02/2010	1,34	5,63
91	MÉDIO	08/01/2010	1,23	7,41	129	MÉDIO	15/02/2010	1,34	4,82
92	MÉDIO	09/01/2010	1,27	7,12	130	MÉDIO	16/02/2010	1,34	5,49
93	MÉDIO	10/01/2010	1,34	3,75	131	MÉDIO	17/02/2010	1,34	4,96
94	MÉDIO	11/01/2010	1,34	4,68	132	MÉDIO	18/02/2010	1,34	5,63
95	MÉDIO	12/01/2010	1,33	5,31	133	MÉDIO	19/02/2010	1,29	4,52
96	MÉDIO	13/01/2010	1,32	6,45	134	MÉDIO	20/02/2010	1,29	5,02
97	MÉDIO	14/01/2010	1,30	7,43	135	MÉDIO	21/02/2010	1,28	4,75
98	MÉDIO	15/01/2010	1,29	6,58	136	MÉDIO	22/02/2010	1,28	5,12
99	MÉDIO	16/01/2010	1,29	6,05	137	MÉDIO	23/02/2010	1,27	4,33
100	MÉDIO	17/01/2010	1,29	2,97	138	MÉDIO	24/02/2010	1,27	5,33
101	MÉDIO	18/01/2010	1,29	4,38	139	MÉDIO	25/02/2010	1,27	4,93
102	MÉDIO	19/01/2010	1,28	5,64	140	MÉDIO	26/02/2010	1,26	4,29
103	MÉDIO	20/01/2010	1,30	3,65	141	MÉDIO	27/02/2010	1,26	4,66
104	MÉDIO	21/01/2010	1,30	5,32	142	MÉDIO	28/02/2010	1,26	5,15
105	MÉDIO	22/01/2010	1,29	6,84	143	MÉDIO	01/03/2010	1,25	4,88
106	MÉDIO	23/01/2010	1,28	3,97	144	MÉDIO	02/03/2010	1,25	4,87
107	MÉDIO	24/01/2010	1,28	3,83	145	MÉDIO	03/03/2010	1,25	4,86
108	MÉDIO	25/01/2010	1,27	7,25	146	MÉDIO	04/03/2010	1,24	4,85
109	MÉDIO	26/01/2010	1,26	6,32	147	MÉDIO	05/03/2010	1,24	4,47
110	MÉDIO	27/01/2010	1,27	6,47	148	MÉDIO	06/03/2010	1,24	4,59
111	MÉDIO	28/01/2010	1,26	6,57	149	MÉDIO	07/03/2010	1,24	4,83
112	MÉDIO	29/01/2010	1,26	5,78	150	MÉDIO	08/03/2010	1,24	5,20
113	MÉDIO	30/01/2010	1,25	6,14	151	MÉDIO	09/03/2010	1,24	5,19
114	MÉDIO	31/01/2010	1,25	6,00	152	MÉDIO	10/03/2010	1,23	4,57

Continuação

Continua

DAC	Estádios	Datas	Kc-dual	ETc	DAC	Estádios	Datas	Kc-dual	ETc
153	MÉDIO	11/03/2010	1,23	4,56	191	MÉDIO	18/04/2010	1,34	5,17
154	MÉDIO	12/03/2010	1,23	5,42	192	MÉDIO	19/04/2010	1,34	6,45
155	MÉDIO	13/03/2010	1,23	5,17	193	MÉDIO	20/04/2010	1,34	5,64
156	MÉDIO	14/03/2010	1,23	4,43	194	MÉDIO	21/04/2010	1,34	4,70
157	MÉDIO	15/03/2010	1,23	5,04	195	MÉDIO	22/04/2010	1,34	6,61
158	MÉDIO	16/03/2010	1,23	5,04	196	MÉDIO	23/04/2010	1,34	6,65
159	MÉDIO	17/03/2010	1,23	4,57	197	MÉDIO	24/04/2010	1,34	6,61
160	MÉDIO	18/03/2010	1,23	4,56	198	MÉDIO	25/04/2010	1,34	6,67
161	MÉDIO	19/03/2010	1,23	5,42	199	MÉDIO	26/04/2010	1,34	7,09
162	MÉDIO	20/03/2010	1,23	5,42	200	MÉDIO	27/04/2010	1,34	6,26
163	MÉDIO	21/03/2010	1,23	4,80	201	MÉDIO	28/04/2010	1,27	6,27
164	MÉDIO	22/03/2010	1,23	5,16	202	MÉDIO	29/04/2010	1,27	7,28
165	MÉDIO	23/03/2010	1,23	4,42	203	MÉDIO	30/04/2010	1,26	7,52
166	MÉDIO	24/03/2010	1,24	4,83	204	MÉDIO	01/05/2010	1,26	7,47
167	MÉDIO	25/03/2010	1,24	6,79	205	MÉDIO	02/05/2010	1,25	7,42
168	MÉDIO	26/03/2010	1,29	5,68	206	MÉDIO	03/05/2010	1,25	6,50
169	MÉDIO	27/03/2010	1,28	6,69	207	MÉDIO	04/05/2010	1,27	6,79
170	MÉDIO	28/03/2010	1,29	6,55	208	MÉDIO	05/05/2010	1,26	4,58
171	MÉDIO	29/03/2010	1,28	6,00	209	MÉDIO	06/05/2010	1,28	6,38
172	MÉDIO	30/03/2010	1,27	6,96	210	MÉDIO	07/05/2010	1,27	6,80
173	MÉDIO	31/03/2010	1,27	6,48	211	MÉDIO	08/05/2010	1,27	5,62
174	MÉDIO	01/04/2010	1,27	7,10	212	MÉDIO	09/05/2010	1,28	6,52
175	MÉDIO	02/04/2010	1,26	7,04	213	MÉDIO	10/05/2010	1,27	6,91
176	MÉDIO	03/04/2010	1,26	7,09	214	MÉDIO	11/05/2010	1,27	7,59
177	MÉDIO	04/04/2010	1,25	7,06	215	MÉDIO	12/05/2010	1,26	5,81
178	MÉDIO	05/04/2010	1,25	6,93	216	MÉDIO	13/05/2010	1,29	5,51
179	MÉDIO	06/04/2010	1,26	5,57	217	MÉDIO	14/05/2010	1,34	6,03
180	MÉDIO	07/04/2010	1,29	6,48	218	MÉDIO	15/05/2010	1,28	6,60
181	MÉDIO	08/04/2010	1,28	7,23	219	MÉDIO	16/05/2010	1,28	7,33
182	MÉDIO	09/04/2010	1,34	3,82	220	MÉDIO	17/05/2010	1,27	7,15
183	MÉDIO	10/04/2010	1,34	5,53	221	MÉDIO	18/05/2010	1,27	7,45
184	MÉDIO	11/04/2010	1,34	7,12	222	MÉDIO	19/05/2010	1,27	7,38
185	MÉDIO	12/04/2010	1,34	7,25	223	MÉDIO	20/05/2010	1,26	7,47
186	MÉDIO	13/04/2010	1,34	6,73	224	MÉDIO	21/05/2010	1,26	7,29
187	MÉDIO	14/04/2010	1,28	6,76	225	MÉDIO	22/05/2010	1,25	7,39
188	MÉDIO	15/04/2010	1,27	6,05	226	MÉDIO	23/05/2010	1,25	7,75
189	MÉDIO	16/04/2010	1,34	7,06	227	MÉDIO	24/05/2010	1,25	6,93
190	MÉDIO	17/04/2010	1,34	4,81	228	MÉDIO	25/05/2010	1,25	5,45

Continuação

Continua

DAC	Estádios	Datas	Kc-dual	ETc	DAC	Estádios	Datas	Kc-dual	ETc
229	MÉDIO	26/05/2010	1,26	6,90	267	FINAL	03/07/2010	1,34	4,96
230	MÉDIO	27/05/2010	1,25	7,08	268	FINAL	04/07/2010	1,34	6,83
231	MÉDIO	28/05/2010	1,25	7,07	269	FINAL	05/07/2010	1,27	6,63
232	MÉDIO	29/05/2010	1,25	7,12	270	FINAL	06/07/2010	1,26	6,17
233	MÉDIO	30/05/2010	1,24	7,05	271	FINAL	07/07/2010	1,25	4,61
234	MÉDIO	31/05/2010	1,24	3,84	272	FINAL	08/07/2010	1,25	4,50
235	MÉDIO	01/06/2010	1,34	7,20	273	FINAL	09/07/2010	1,26	3,39
236	MÉDIO	02/06/2010	1,29	6,38	274	FINAL	10/07/2010	1,34	5,23
237	MÉDIO	03/06/2010	1,28	8,65	275	FINAL	11/07/2010	1,34	4,82
238	MÉDIO	04/06/2010	1,27	8,43	276	FINAL	12/07/2010	1,34	3,62
239	MÉDIO	05/06/2010	1,34	6,66	277	FINAL	13/07/2010	1,34	5,90
240	MÉDIO	06/06/2010	1,34	6,97	278	FINAL	14/07/2010	1,28	5,50
241	MÉDIO	07/06/2010	1,34	6,57	279	FINAL	15/07/2010	1,26	5,79
242	MÉDIO	08/06/2010	1,34	6,91	280	FINAL	16/07/2010	1,24	5,97
243	MÉDIO	09/06/2010	1,32	7,06	281	FINAL	17/07/2010	1,34	3,89
244	MÉDIO	10/06/2010	1,32	6,84	282	FINAL	18/07/2010	1,34	5,63
245	MÉDIO	11/06/2010	1,31	6,76	283	FINAL	19/07/2010	1,34	6,03
246	MÉDIO	12/06/2010	1,30	6,22	284	FINAL	20/07/2010	1,34	6,57
247	MÉDIO	13/06/2010	1,29	6,56	285	FINAL	21/07/2010	1,31	5,77
248	MÉDIO	14/06/2010	1,34	6,03	286	FINAL	22/07/2010	1,32	4,63
249	MÉDIO	15/06/2010	1,34	2,06	287	FINAL	23/07/2010	1,34	4,82
250	MÉDIO	16/06/2010	1,34	3,89	288	FINAL	24/07/2010	1,34	5,23
251	MÉDIO	17/06/2010	1,34	3,22	289	FINAL	25/07/2010	1,34	4,42
252	MÉDIO	18/06/2010	1,34	4,15	290	FINAL	26/07/2010	1,32	2,11
253	MÉDIO	19/06/2010	1,34	4,96	291	FINAL	27/07/2010	1,31	4,96
254	MÉDIO	20/06/2010	1,34	6,16	292	FINAL	28/07/2010	1,27	5,10
255	MÉDIO	21/06/2010	1,34	6,30	293	FINAL	29/07/2010	1,24	4,35
256	MÉDIO	22/06/2010	1,34	4,42	294	FINAL	30/07/2010	1,25	5,11
257	MÉDIO	23/06/2010	1,34	5,90	295	FINAL	31/07/2010	1,27	4,69
258	MÉDIO	24/06/2010	1,34	5,90	296	FINAL	01/08/2010	1,30	4,30
259	MÉDIO	25/06/2010	1,34	6,57	297	FINAL	02/08/2010	1,27	4,70
260	MÉDIO	26/06/2010	1,34	6,16	298	FINAL	03/08/2010	1,27	5,59
261	FINAL	27/06/2010	1,34	6,43	299	FINAL	04/08/2010	1,23	4,80
262	FINAL	28/06/2010	1,34	5,36	300	FINAL	05/08/2010	1,20	5,14
263	FINAL	29/06/2010	1,34	4,69	301	FINAL	06/08/2010	1,16	3,71
264	FINAL	30/06/2010	1,34	4,82	302	FINAL	07/08/2010	1,25	4,24
265	FINAL	01/07/2010	1,34	4,29	303	FINAL	08/08/2010	1,21	5,94
266	FINAL	02/07/2010	1,34	5,49	304	FINAL	09/08/2010	1,17	4,90

Continuação

Continua

DAC	Estádios	Datas	Kc-dual	ETc	DAC	Estádios	Datas	Kc-dual	ETc
305	FINAL	10/08/2010	1,26	5,93	313	FINAL	18/08/2010	1,06	5,21
306	FINAL	11/08/2010	1,26	5,05	314	FINAL	19/08/2010	1,05	4,43
307	FINAL	12/08/2010	1,29	3,47	315	FINAL	20/08/2010	1,02	4,69
308	FINAL	13/08/2010	1,27	2,41	316	FINAL	21/08/2010	0,99	4,93
309	FINAL	14/08/2010	1,24	5,35	317	FINAL	22/08/2010	1,17	2,34
310	FINAL	15/08/2010	1,19	5,37	318	FINAL	23/08/2010	1,34	3,89
311	FINAL	16/08/2010	1,15	5,04	319	FINAL	24/08/2010	1,34	6,97
312	FINAL	17/08/2010	1,10	4,85	320	FINAL	25/08/2010	1,34	5,49