



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
UNIDADE CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA



RENATO AMÉRICO DE ARAÚJO NETO

**MÉTODOS PARA DETERMINAR A EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL DA CANA-
DE-AÇÚCAR**

Rio Largo - AL
2013

RENATO AMÉRICO DE ARAÚJO NETO

**MÉTODOS PARA DETERMINAR A EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL DA CANA-
DE-AÇÚCAR**

Dissertação apresentada ao Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Agronomia do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Agronomia, Área de Concentração: Produção Vegetal.

Orientador: Prof. Dr. José Leonaldo de Souza

Rio Largo - AL

2013

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecária Responsável: Helena Cristina Pimentel do Vale

A663m Araújo Neto, Renato Américo de.
 Métodos para determinar a evapotranspiração real da cana-de-açúcar / Renato Américo de Araújo Neto. – 2013.
 79 f.

 Orientador: José Leonaldo de Souza.
 Dissertação (mestrado em Agronomia : Produção vegetal) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Ciências Agrárias. Rio Largo, 2013.

 Bibliografia: f.73-79.

 1. Cultivos agrícolas. 2. Cana-de-açúcar. 3. Recursos hídricos. 4. Cana-de-açúcar – Irrigação. 5. Agrometeorologia. I. Título.

CDU:633.34

A Deus, fonte de todo o saber, aquele que me deu o dom da vida e do aprendizado; à minha mãe Malila Araújo pelos primordiais ensinamentos; aos meus avós Renato Araújo e Jaminita Alves, pelo carinho e exemplo concedidos; à minha namorada Géssyca Melo por suportar todo meu estresse com amor,

DEDICO

A todos que persistem com amor e carinho à dedicação do saber e à pesquisa científica, possuindo, acima de tudo, sabedoria e humildade,

OFEREÇO

“Nós sabemos mais sobre o movimento dos astros que sobre os solos abaixo de nossos pés.”

(Leonardo da Vinci, 1452 – 1519)

“C’est le temps que tu a perdu pour ta rose qui fait ta rose si importante.”

(Antoine de Saint-Exupéry, 1900 - 1944)

“Dixi et salvavi animam meam.”

(Karl Marx, 1818 - 1883)

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador professor Dr. José Leonaldo de Souza pelos ensinamentos científicos e pelo amadurecimento na vida acadêmica;

Aos membros da banca Prof. Dr. Guilherme Bastos Lyra e Prof. Dr. Iêdo Teodoro, pelas sugestões dadas ao trabalho;

Ao membro externo Prof. Dr. Stoécio Malta Ferreira Maia pela disponibilidade em fazer parte da banca;

Ao Coordenador da pós-graduação, Prof. Dr. Eurico Eduardo Pinto Lemos pelo empenho na melhoria do curso de mestrado em Agronomia;

Aos colegas do Laboratório de Agrometeorologia e Radiometria Solar, Adolpho Emanuel, Anthony Carlos, Cícero Manoel, Cícero Teixeira, Franklin dos Anjos, Joelmir Albuquerque, Marshall Victor, Maurício Prado, Ricardo Araújo e Valesca Fernandes, pelo companheirismo e apoio acadêmico durante esses dois anos de convivência;

Aos colegas de turma do mestrado: Benigno França, Djison Silvestre, Inajal Rodrigues, Jadilson Macedo, Letice Souza, Lucas Medeiros, Polyana Cavalcante, Tatiana Salvador e William Rodrigues pelo empenho durante o curso;

Aos professores do programa de pós-graduação em Agronomia, em especial aqueles que me fizeram de forma especial um desbravador na ciência: Prof. Dra. Vilma Marques, ao saudoso professor Dr. José Paulo Vieira, Prof. Dr. José Vieira, Prof. Dr. Paulo Vanderlei Ferreira, Prof. Dra. Leila Rezende pela contribuição científica;

Ao funcionário da pós-graduação em Agronomia, Geraldo, pelas dicas concedidas na reta final do curso;

À Fundação de Amparo à Pesquisa (FAPEAL) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa.

Meu cordial agradecimento.

RESUMO

Um fator essencial para o desenvolvimento da cana-de-açúcar é a ótima distribuição de água ao longo do seu ciclo. Em cultivo de sequeiro existe uma necessidade do conhecimento da demanda hídrica através da evapotranspiração real (ETR) em várias fases de desenvolvimento da cultura, para melhor planejamento das operações agrícola (preparo do solo, adubação, plantio, plantas daninhas, doenças, pragas, colheita e/ou irrigação), visando aumentar a produtividade. Quando a ETR não é medida, ela é calculada através de várias metodologias que varia de acordo com as condições físicas do solo, fisiologia da planta e ambiente atmosférico. Assim, objetivou-se avaliar a evapotranspiração real em cultivo de cana-de-açúcar através de cinco métodos e avaliar o armazenamento de água no solo (ARM) por três métodos. O estudo foi realizado com base nos dados obtidos em pesquisa de campo no Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas, na região de Rio Largo, Alagoas, no período de setembro de 2005 a novembro de 2006. A variedade de cana-de-açúcar utilizada foi a RB92579. Na estimativa da ETR, em escala de tempo quinidial (cinco em cinco dias) fez-se uso de: i) método Penman-Monteith FAO “Kc dual” (ETR 1); ii) método da água disponível em sua forma original (ETR 2,a – NULLET; GIAMBELLUCA, 1988) e suas modificações utilizando o crescimento radicular pelo coeficiente da cultura e índice de área foliar (ETR 2,b e ETR 2,c, respectivamente); iii) método do balanço hídrico de cultivo (ETR 3 – THORNTHWAITE; MATHER, 1955); iv) método Penman-Monteith FAO “Kc único” com coeficiente de redução ($K_s = ETR/ET_c$) derivado do método da água disponível proposto por Nullet e Giambelluca (ETR 4,a) e do método do balanço hídrico de cultivo proposto por Thornthwaite e Mather (ETR 4,b); v) método Penman-Monteith com resistência da superfície do dossel (ETR 5). Determinou-se ainda o ARM, com base nas metodologias ETR 1; ETR 2,a; ETR 2,b; ETR 2,c e ETR 3, classificando-os como ARM 1; ARM 2,a; ARM 2,b; ARM 2,c e ARM 3. Inicialmente, os métodos foram comparados com ARM 1 e durante o período chuvoso, foram comparados todos os métodos com o ARM real, medido *in situ* com auxílio do TDR (reflectometria no domínio do tempo). Todos os resultados foram comparados estatisticamente através do índice de concordância de Willmont (d), coeficiente de correlação de Pearson (r), desvio percentual (DP) e raiz quadrada do erro médio (RMSE). Os métodos ETR 2,a e ETR 4,a apresentaram melhores índices estatísticos quando comparado com ETR 1, seguido de ETR 3 e ETR 2,c. O método para ETR 5 mostrou melhor ajuste durante o período chuvoso, com coeficiente de correlação (r) de 0,95. Observa-se que a ETR variou de 754 mm (ETR 2,c) até 1052 mm (ETR 3). Os ARM 2,b; ARM,2c e ARM 3* apresentaram melhores ajustes comparado ao ARM 1. Ao comparar-se o ARM obtido pelos métodos com o ARM real, melhores índices estatísticos ($d = 0,99$ e $RMSE = 5,57$ mm) foram para ARM 2,c.

Palavras-chave: Cultivos agrícolas. Disponibilidade hídrica. Irrigação. Agrometeorologia.

ABSTRACT

An essential factor for sugarcane development is the optimal water distribution along its cycle. In rainfed crop there is a need of water demand knowledge by actual evapotranspiration (ETR) in various development crop stages, for better planning of agricultural operations (tillage, fertilization, planting, weeds, diseases, pests, harvest and/or irrigation) to increase productivity. When no measure ETR this is calculated by various methods which varies according with physical soil, physiology crop and atmospheric ambient conditions. Thus the objective was to evaluate the actual evapotranspiration in sugarcane crop by five methods and evaluate soil water storage (ARM) by three methods. This study was performed based on field research data at Centro de Ciências Agrárias at Universidade Federal de Alagoas in Rio Largo-Alagoas region from September 2005 to November 2006. A RB92579 sugarcane variety was used. In ETR estimation in quinquidial time scale (five days) made use of: i) Penman-Monteith FAO “dual Kc” method (ETR 1); ii) available water method in its original form (ETR 2,a – NULLET; GIAMBELLUCA, 1988) and its modifications using root growth by crop coefficient and leaf area index (ETR 2,c and ETR 2,c); iii) crop water balance (ETR 3 – THORNTHWAITE; MATHER, 1955); iv) Penman-Monteith FAO “single Kc” method with reduction coefficient ($K_s = ETR/ET_c$) derived from the available water method proposed by Nullet and Giambelluca (ETR 4,a) and crop water balance proposed by Thornthwaite and Mather (ETR 4,b); v) Penman-Monteith with canopy surface resistance (ETR 5). We Calculated the ARM based methodologies ETR 1; ETR 2, a; ETR 2,b; ETR 2,c and ETR 3 classified then as ARM 1; ARM 2,a; ARM 2,b; ARM 2,c and ARM 3. Initially this methods were compared with ARM 1 and during rainy season were compared all methods with real ARM measured *in situ* with TDR (Time Domain Reflectometry). All results were statistically compared through Willmont index agreement (d), Pearson correlation coefficient (r), percentage deviation (DP) and root mean squared error (RMSE). The ETR 2,a and ETR 4,a methods showed better statistical indexes when compared with ETR 1, followed by ETR 3 and ETR 2,c. The ETR 5 method showed better adjustment during the rainy season with correlation coefficient (r) of 0,95. It is observed the ETR ranged from 754 mm (ETR 2,c) to 1052 mm (ETR 3). The ARM 2,b; ARM 2,c and ARM3* showed better adjustment compared to ARM 1. When comparing the ARM methods with real ARM, the best statistical indexes ($d = 0,99$ and $RMSE = 5,57$ mm) for ARM 2,c.

Keywords: Agricultural crops. Water availability. Irrigation. Agrometeorology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização geográfica de Rio Largo-AL e vista da estação agrometeorológica.	31
Figura 2 – Temperatura e umidade relativa do ar média (a), velocidade do vento (b) Radiação Global e Saldo de Radiação (c) e déficit de pressão de vapor (d) para um cultivo de cana-de-açúcar em Rio Largo-AL. Descrição das fases fenológicas adaptada para a cultura (I – inicial; II – crescimento; III – intermediário; IV – Final).	40
Figura 3 – Chuva efetiva (P-RO) (a) e evapotranspiração de referência (b) para um cultivo de cana-de-açúcar em Rio Largo-AL. Descrição das fases fenológicas adaptada para a cultura (I – inicial; II – crescimento; III – intermediário; IV – Final).	41
Figura 4 – Variação da Altura da Planta (h_c) para um cultivo de cana-de-açúcar em Rio Largo, Alagoas, no período de Setembro de 2005 a Novembro de 2006. Os pontos pretos são valores de h_c medido, enquanto a linha vermelha indica a simulação do IAF pela equação sigmoidal de Boltzmann.	44
Figura 5 – Variação do Índice de Área Foliar (IAF) para um cultivo de cana-de-açúcar em Rio Largo, Alagoas, no período de Setembro de 2005 a Novembro de 2006. Os pontos pretos são valores de IAF medido, enquanto a linha vermelha indica a simulação do IAF pela equação sigmoidal de Boltzmann.	45
Figura 6 – Evaporação e Transpiração quinquidial nas diferentes épocas de crescimento.	46
Figura 7- Coeficiente da cultura basal (K_{cb}), coeficiente da cultura ajustado ($K_{c\text{ajust}}$), coeficiente de evaporação (K_e), fator de depleção da transpiração (K_s), para um cultivo de cana-de-açúcar em Rio Largo, Alagoas.	47
Figura 8 – Coeficiente da cultura calculado da cana-de-açúcar em regime de sequeiro, sob condições climáticas na região de Rio Largo, Alagoas e coeficiente da cultura tabelado do Boletim FAO 56 (Allen et al., 1998).	49
Figura 9 – Evapotranspiração real pelo método Penman-Monteith FAO “Kc dual” (ETR 1) e evapotranspiração da cultura (ETC), para um cultivo de cana-de-açúcar em Rio Largo, AL.	51
Figura 10 – Evapotranspiração real pelo método da água disponível (ETR 2) , para um cultivo de cana-de-açúcar em Rio Largo, AL, em que: ETR 2,a – método original; ETR 2,b – método modificado pelo Kc e ETR 2,c – método modificado pelo IAF.	53
Figura 11 – Evapotranspiração real pelo método de Penman-Monteith FAO “Kc dual” (ETR 1) e evapotranspiração pelo método da água disponível original (ETR 2,a) e suas modificações (ETR 2,b e ETR 2,c) , para um cultivo de cana-de-açúcar em Rio Largo, AL.	56
Figura 12 – Correlação da Evapotranspiração real pelo método Penman-Monteith FAO “Kc dual” (ETR 1) e o método da água disponível original (ETR 2,a) e suas modificações (ETR 2,b e ETR 2,c).	57
Figura 13 – Evapotranspiração real pelo método Penman-Monteith FAO “Kc dual” (ETR 1) e balanço hídrico de cultivo (ETR 3), para um cultivo de cana-de-açúcar em Rio Largo, AL.	58

Figura 14 – Correlação da evapotranspiração real pelo método Penman-Monteith FAO “Kc dual” (ETR 1) e o método do balanço hídrico de cultivo (ETR 3).	60
Figura 15 – Evapotranspiração pelo método Penman-Monteith FAO “Kc dual” (ETR 1) e pelo método do balanço hídrico de cultivo (ETR 3), para um cultivo de cana-de-açúcar em Rio Largo, AL.....	61
Figura 16 – Correlação da evapotranspiração real pelo método Penman-Monteith FAO “Kc dual” (ETR 1) e o método Penman-Montetih FAO “Kc único” (ETR 4), onde: ETR 4,a ($ETC \cdot K_{s1}$) e ETR 4,b ($ETC \cdot K_{s2}$), em que o Ks foi determinado por ETR/ET_c	63
Figura 17 – Evapotranspiração pelo método Penman-Monteith FAO “Kc dual” (ETR 1) e pelo método Penman – Monteith com resistência estomática (ETR 5) para um cultivo de cana-de-açúcar em Rio Largo, AL.....	64
Figura 18 – Correlação entre a evapotranspiração real pelo método Penman-Monteith FAO “Kc dual” (ETR 1) e o método Penman-Montetih com resistência estomática (ETR 5) durante os em função diária.....	65
Figura 19 – Variação no armazenamento de água no solo através de três métodos: Allen et al. (1998) – ARM 1; Nullet e Giambelluca (1988) – ARM 2,a e suas modificações – ARM 2,b e ARM 2,c e Thornthwaite e Mather (1955) – ARM 3 e ARM 3*, para um cultivo de cana-de-açúcar em Rio Largo, Alagoas.	68
Figura 20 – Correlação entre o Armazenamento obtido método Penman-Monteith FAO Kc “dual” (ARM 1), método da água disponível original (ARM 2,a), suas modificações (ARM 2,b e ARM 2,c) e Balanço hídrico de cultivo (ARM 3) e modificação (ARM3*) para um cultivo de cana-de-açúcar em Rio Largo – AL.	70
Figura 21 – Correlação entre o Armazenamento real (ARM real) comparado com o obtido método Penman-Monteith FAO Kc “dual” (ARM 1), método da água disponível original (ARM 2,a) e modificações (ARM 2,b e ARM 2,c) e Balanço hídrico de cultivo (ARM 3)para um cultivo de cana-de-açúcar em Rio Largo – AL, durante os 241 aos 404 DAP.....	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Umidade do solo nas profundidades de 0-30 e 30-60cm.....	29
Tabela 2 – Variação da nomenclatura de ETR estimada pelo método do balanço de água proposto por Nullet e Giambelluca (1988) (ETR ₂) em função dos métodos de determinação da profundidade da raiz (Zr).....	34
Tabela 3 – Duração e período das fases de desenvolvimento para o cultivo da cana-de-açúcar em Rio Largo-AL, no período de 2005 e 2006.	36
Tabela 4 – Variação da nomenclatura de ETR estimada pelo método do Kc único (ETR ₄) em função dos métodos de determinação do coeficiente de redução de água no solo (Ks)	36
Tabela 5 – Valores máximos e mínimos para temperatura e umidade relativa do ar média (T _{ar} e UR _{ar}), déficit de pressão de vapor (DPV), velocidade do vento (VV), saldo de radiação (Rn), radiação global (Rg), chuva efetiva (P-RO) e evapotranspiração de referência (ET _o), para as fases Inicial (Fase I), Crescimento (Fase II), Intermediário (Fase III) e Final (Fase IV) para um cultivo de cana-de-açúcar em Rio Largo-AL, no período de Setembro de 2005 a Novembro de 2006.....	42
Tabela 6 – Parâmetros da equação sigmóide de Boltzmann para a estimativa da Altura da Planta (h _c).....	44
Tabela 7 – Parâmetros da equação sigmóide de Boltzmann para a estimativa do Índice de Área Foliar (IAF).	45
Tabela 8 – Índice de concordância (d), desvio de porcentagem (DP) e raiz quadrada do erro médio (RMSE) para os métodos da água disponível (ETR 2) comparado com o método Penman-Monteith FAO “Kc dual” (ETR 1) em um cultivo de cana-de-açúcar, na região de Rio Largo-AL.....	58
Tabela 9 – Índice de concordância (d), desvio de porcentagem (DP) e raiz quadrada do erro médio (RMSE) para o método do balanço hídrico de cultivo (ETR 3) comparado com Penman-Monteith FAO “Kc dual” (ETR 1) em um cultivo de cana-de-açúcar na Região de Rio Largo-AL.	60
Tabela 10 – Índice de concordância (d), desvio de porcentagem (DP) e raiz quadrada do erro médio (RMSE) para os métodos Penman-Monteith FAO “Kc único” (ETR 4,a e ETR 4,b), comparado pelo método Penman-Monteith FAO “Kcdual” (ETR 1) em um cultivo de cana-de-açúcar na Região de Rio Largo-AL.	63
Tabela 11 – Índice de concordância (d), desvio de porcentagem (DP) e raiz quadrada do erro médio (RMSE) para o método Penman-Monteith com resistência estomática (ETR 5) comparado com o método Penman-Monteith FAO “Kcdual” (ETR 1) em um cultivo de cana-de-açúcar na Região de Rio Largo-AL, no período de 225 a 333 DAP.	65
Tabela12 – Índice de concordância (d), desvio de porcentagem (DP) e raiz quadrada do erro médio (RMSE) para os métodos de armazenamento de água no solo comparado com o método Penman-Monteith FAO “Kc dual” (ARM 1) em um cultivo de cana-de-açúcar na Região de Rio Largo-AL.	71

Tabela 13 – Índice de concordância (d), desvio de porcentagem (DP) e raiz quadrada do erro médio (RMSE) para os métodos de armazenamento de água no solo comparado com o armazenamento real do solo medido com TDR (ARM real) em um cultivo de cana-de-açúcar na Região de Rio Largo-AL, durante os 241 aos 404 DAP.	71
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DAP	dias após o plantio
FAO	Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura
<i>few</i>	fração de solo exposta ao molhamento
h_c	altura da planta
IAF	índice de área foliar
K_2O	óxido de potássio
N	número de observações
NEG. ACUM.	negativo acumulado
O'_i	valor observado subtraído da média da variável observada
O_i	valor observado
p	fração de TAW que a cultura pode extrair na zona radicular
PC	Ponto Crítico
PD	porcentagem de desvio
PMGCA	Programa de Melhoramento Genético de Cana-de-Açúcar
QAP	quinquédeos após o plantio
RB	República do Brasil
RMSE	raiz quadrada do erro médio
SSPA	Sistema solo-planta-atmosfera
TDR	Reflectometria no Domínio do Tempo
UFAL	Universidade Federal de Alagoas

LISTA DE SÍMBOLOS

AF	área foliar (m^2)
ALT	alteração no armazenamento (mm)
ARD	água realmente disponível (mm)
ARD_{i-1}	água realmente disponível do dia anterior
ARM	armazenamento de água no solo (mm)
b	coeficiente angular da regressão linear simples
c	índice de confiança
CAD	Capacidade de Água Disponível (mm)
c_p	calor específico do ar seco ($\text{MJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)
CR	ascensão capilar (mm d^{-1})
d	deslocamento do plano zero (m)
D	Drenagem (mm d^{-1})
d	índice de concordância de Willmont
DEF	deficiência hídrica (mm)
DPV	déficit de pressão de vapor (kPa)
E	evaporação (mm d^{-1})
ET_c	Evapotranspiração da cultura (mm d^{-1})
ET_o	Evapotranspiração de referência (mm d^{-1})
ETR	Evapotranspiração real (mm d^{-1})
EXC	excesso hídrico (mm)
G	fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)
I	Irrigação (mm d^{-1})
k	constante de Von Karman
K_{c dual}	Coeficiente da cultura “dual”
K_{c único}	Coeficiente da cultura “único”
K_c	Coeficiente da cultura
K_{c_{ajust}}	coeficiente da cultura ajustado
K_{cb}	Coeficiente da cultura basal
K_{c_{max}}	coeficiente da cultura máximo
K_e	Coeficiente de evaporação do solo
K_s	Coeficiente de estresse hídrico
N	nitrogênio
P	Precipitação pluvial (mm d^{-1})
P'_i	valor estimado subtraído da média da variável observada
P₂O₅	pentóxido de fósforo
P_i	valor estimado
RO	escoamento superficial (mm d^{-1})
r_a	resistência aerodinâmica (s m^{-1})
R_g	radiação solar global ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)
R_n	saldo de radiação (MJ m^{-2})
r_s	resistência da superfície do dossel (s m^{-1})
T	temperatura do ar ($^\circ\text{C}$)
T	transpiração (mm d^{-1})
TAW	total de água disponível na zona radicular (mm)
UR	umidade relativa do ar (%)
u_z	velocidade do vento à determinada altura “z” (m s^{-1})

	comprimento de rugosidade governado pela transferência de calor e vapor (m)
Zom	comprimento de rugosidade que rege a transferência de momento (m)
Zr	profundidade da raiz no perfil do solo (m)
γ	constante psicrométrica
ΔH	variação no armazenamento (mm d^{-1})
θ_{cc}	conteúdo de água no solo na capacidade de campo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)
θ_{pm}	conteúdo de água no solo no ponto de murcha permanente ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)
λ	calor latente de vaporização (MJ kg^{-1})

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
2	REVISÃO DE LITERATURA	21
2.1	A cultura da cana-de-açúcar e exigências bioclimáticas	21
2.2	Evapotranspiração de Referência (ET_o)	22
2.3	Evapotranspiração da Cultura (ET_c) e Coeficiente da Cultura (K_c)	23
2.4	Evapotranspiração Real da cultura (ET_R) e balanço de água no solo	25
3	MATERIAL E MÉTODOS	29
3.1	Área de estudo	29
3.2	Observações biométricas da cultura	29
3.3	Observações Agrometeorológicas	30
3.4	Estimativas da evapotranspiração real	31
3.4.1	ETR 1 - Método Penman-Monteith FAO K _c dual (ALLEN et al., 1998)	31
3.4.2	ETR 2 - Método da água disponível (NULLET; GIAMBELLUCA, 1988)	33
3.4.3	ETR 3 – Método do Balanço Hídrico de cultivo (THORNTHWAITE; MATHER, 1955)	34
3.4.4	ETR 4 – Método Penman-Monteith FAO K _c único (ALLEN et al., 1998)	35
3.4.5	ETR 5 – Método de Penman-Monteith com Resistência da Superfície do Dossel (ALLEN et al., 1998)	37
3.5	Análise das estimativas	38
3.5.1	Índice de Concordância	38
3.5.2	Coeficiente de Correlação de Pearson	39
3.5.3	Desvio Percentual	39
3.5.4	Raiz Quadrada do Erro Médio	39
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
4.1	Condições meteorológicas do cultivo	40

4.2	Condição cultural (IAF e Altura da planta).....	43
4.3	Evaporação, transpiração e coeficiente da cultura.....	46
4.4	Evapotranspiração Real.....	51
4.4.1	ETR 1 - Método Penman-Monteith FAO Kc dual.....	51
4.4.2	ETR 2 - Método da água disponível (NULLET; GIAMBELLUCA, 1988).....	53
4.4.3	ETR 3 – Método do Balanço Hídrico de cultivo (THORNTHWAITE; MATHER, 1955)	58
4.4.4	ETR 4 – Método Penman-Monteith FAO Kc único	60
4.4.5	ETR 5 – Método de Penman-Monteith com Resistência da Superfície do Dossel.....	63
4.5	Condições Hídricas do solo	66
5	CONCLUSÕES	73
	REFERÊNCIAS	74

1 INTRODUÇÃO

A cultura da cana-de-açúcar é cultivada em várias regiões do planeta, visando à produção de açúcar e energia. Porém, para que a planta produza em seu potencial máximo, há necessidade do conhecimento ambiental onde se deseja cultivar, e, uma das variáveis meteorológicas essenciais é a distribuição das chuvas na região. A cana-de-açúcar tem seu ótimo desenvolvimento em condições hídricas com chuva entre 1500 e 2500 mm (DOOREMBOS; KASSAM, 1979), uniformemente distribuídas durante o período de cultivo. Porém, para o estado de Alagoas (mais precisamente na região metropolitana de Maceió) 70% da precipitação pluvial concentram-se entre os meses de março a setembro (SOUZA et al., 2004), indicando a necessidade de um planejamento para o melhor aproveitamento da água disponível. Assim, haverá um manejo adequado da cultura em função da disponibilidade hídrica, proporcionando melhores rendimentos na produção final.

Em cultivos de sequeiro, o planejamento da época de plantio é essencial para uma ótima produção final dos colmos, já que o estresse hídrico decorrente pelo déficit de água no solo acarreta em diminuição do crescimento foliar, reduzindo a área de absorção de luz do dossel e conseqüentemente menos produção final. A perda de água para atmosfera em um cultivo é dada através de dois processos: evaporação e transpiração. A evaporação em cultivos agrícolas dá-se pela perda de água da superfície do solo e a transpiração é a água evaporada nos estômatos. A soma da evaporação com a transpiração se chama evapotranspiração (ET). Para a determinação da evapotranspiração de uma cultura (ET_c) qualquer, deve ter-se o conhecimento da evapotranspiração de uma planta de referência (geralmente grama ou alfafa), conhecida como evapotranspiração de referência (ET_o). A ET_o, juntamente com a evapotranspiração da cultura (ET_c), é obtida em plantios sem restrição hídrica.

No entanto, para cultivos de sequeiro, a quantidade de água evapotranspirada pelo dossel foliar será menor que a ET_c. Esse fenômeno é conhecido como evapotranspiração real (ETR), caracterizado como a real quantidade de água evapotranspirada por uma determinada cultura, em condições hídricas variáveis (abaixo da condição ideal descrita pela ET_c). Os valores de ETR variam com a disponibilidade hídrica no solo, textura do solo, manejo de irrigação e condições meteorológicas. A distribuição das chuvas é um fator fundamental à ETR, onde em períodos com disponibilidade hídrica menores a ETR tende a decrescer a valores mínimos. O contrário é observado no período mais chuvoso, em que a ETR se aproxima à ET_c, podendo ser igual. A determinação dos valores reais da evapotranspiração

tem levado à comunidade científica a desenvolver diversos métodos (THORNTHWAITE; MATHER, 1955; RITCHIE, 1972; CAMPBELL; DIAZ, 1988). Esses métodos envolvem o cálculo da ETR em suas componentes (evaporação+transpiração) determinadas separadamente ou em conjunto. No entanto, existe a necessidade de adaptação desses métodos para a região local de estudo, já que os mesmos foram desenvolvidos para regiões específicas, com condições climáticas, ambientais e de cultivo diferentes.

Diante do exposto, esse trabalho tem como objetivo: I) avaliar a evapotranspiração real em cultivo de cana-de-açúcar através de cinco diferentes métodos; II) adaptar o balanço hídrico para obtenção da evapotranspiração real na cultura da cana-de-açúcar; III) quantificar o armazenamento de água no solo através de três diferentes metodologias; IV) comparar armazenamento de água no solo estimado com dados medidos no solo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A cultura da cana-de-açúcar e exigências bioclimáticas

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*), pertencente à família das poáceas é uma cultura de fácil adaptação ao ambiente, sendo cultivada em mais de cem países distribuídos nas latitudes 37°N e 32°S. (RODRIGUES, 1995; JADOSKI et al., 2010). O plantio durante o ano de 2010 gerou produção de 1,7 bilhões de toneladas de colmos (FAO, 2012), com Ásia e América do Sul sendo os maiores produtores. O Brasil é o principal produtor de cana-de-açúcar com estimativa (safra 2012-2013) de 595,13 milhões de toneladas (CONAB, 2013), atrelando-se essa alta produção de colmos com a disponibilidade de água no solo e atmosfera.

O conhecimento do clima é essencial para o ideal manejo das culturas, sendo necessário o entendimento dos aspectos da temperatura do ar, precipitação pluvial e radiação solar, que juntamente com o manejo racional do solo e água propiciam níveis satisfatórios de produtividade (SILVA et al., 2013). O conhecimento da distribuição das chuvas, por exemplo, é de fundamental importância visando um excelente manejo de preparo do solo e plantio da cultura, onde a variabilidade temporal das condições hídricas no solo, ocasionada pela irregularidade das chuvas provocam uma oscilação no rendimento final, onde regiões com disponibilidade hídrica de 1500 a 2500 mm, distribuídos uniformemente, possuem melhores condições para seu desenvolvimento (DOOREMBOS; KASSAM, 1979; INMAN-BAMBER; SMITH, 2005).

A temperatura influencia na produção de cana-de-açúcar, existindo limites térmicos para a cultura ao longo do seu desenvolvimento. Em geral, admite-se que a cana apresente uma expressiva queda na taxa de crescimento quando submetida a temperaturas abaixo de 20°C e entre 30 e 34°C e o seu crescimento tornando-se nulo em temperaturas abaixo de 16°C e acima de 38°C. Porém, cada fase de desenvolvimento da cana-de-açúcar implica em diferentes limites térmicos para o seu crescimento. A brotação em gemas de cana-planta, por exemplo, tem sua temperatura ideal entre 34 a 37°C, com mínimos e máximos extremos de 21 e 44°C. O perfilhamento, fator essencial para o número de colmos no stand final de plantas, apresenta uma variação térmica ótima entre 20 e 30°C, onde temperaturas abaixo de 5°C e acima de 45°C paralisam o processo de perfilhamento (MARIN et al., 2009).

Em plantios de sequeiro, uma excelente distribuição das chuvas acarreta em altos índices de produtividade na cana-de-açúcar. Para a região de Maceió nos Tabuleiros costeiros, essa distribuição encontra-se entre os meses de maio a agosto onde a precipitação pluvial

média, para um período histórico de 21 anos, é de 1805 mm (SOUZA et al., 2004). Já para a região de Rio Largo durante 2008 e 2009, houve uma distribuição de 1923 mm entre os meses de março a setembro, período em que a cana-de-açúcar encontra-se em crescimento acelerado (FERREIRA JUNIOR et al., 2012). Inman-Bamber e Jager (1986) ao estudarem variedades submetidas ao estresse hídrico moderado e severo constataram que o crescimento foliar e a produção final estão dependentes da disponibilidade hídrica no solo.

Entretanto, nem toda chuva que cai sobre o dossel pode ser efetivamente utilizada no desenvolvimento das culturas. Parte dessa chuva pode ser perdida através do escoamento superficial, infiltrada no solo ou ser evaporada, ou seja, a eficácia das chuvas está dependente da sua intensidade, onde em um ambiente com dossel totalmente coberto recebendo leves chuvas possui maior eficiência que um ambiente com uma precipitação de 8 mm em uma superfície seca e desprovida de cobertura vegetal (MAVI; TUPPER, 2004). Portanto, o conhecimento sobre a resposta da cana-de-açúcar ao estresse hídrico é de fundamental importância, pois plantas submetidas a um estresse hídrico acarretam no déficit de crescimento, retardando o desenvolvimento do dossel, acarretando uma redução da extensão foliar e expansão do índice de área foliar (INMAN-BAMBER, 2004).

2.2 Evapotranspiração de Referência (ET_o)

O termo evapotranspiração (ET) é utilizado para expressar o processo de perda de água de uma determinada superfície vegetada, pela junção dos processos de evaporação das superfícies dos solos, rios e lagos e a transpiração da água pelas superfícies vegetadas. A disponibilidade de água no solo, a fisiologia das plantas e os fatores meteorológicos (radiação solar, vento, temperatura, umidade, etc.) influenciam na taxa da evapotranspiração (ALLEN et al., 1998; MAVI; TUPPER, 2004). Tem-se então a importância do conhecimento sobre ambiente cultivado e clima da região estudada, tendo em mente as características do solo e seu manejo e sobre a demanda hídrica da região. Os dados de ET podem ser obtidos através de medidas diretas (lisimetria, tanque classe A, balanço de água no solo), ou estimada através de modelos empíricos e semi-empíricos (balanço de energia por razão de Bowen, equações de Penman-Monteith, Hargreaves e Blaney-Criddle), ou determinação de ET através de imagens de satélite (DOOREMBOS; PRUITT, 1977; HARGREAVES; SAMANI, 1985; CHIEW et al., 1995; RANA; KATERJI, 2000; ALLEN et al., 2011a; ALLEN et al., 2011b).

Em 1998, a Organização das Nações Unidas adotou em seu boletim de irrigação e drenagem número 56 um cálculo para estimativa do consumo de água pelas plantas para

estudos climáticos através de uma cultura hipotética (grama ou alfafa) com altura uniforme e resistência de superfície específica, denominando-se este processo como Evapotranspiração de Referência (ET_o). Este consiste basicamente em calcular a ET_o, visando à obtenção não somente do consumo de água por uma cultura de referência, mas também obter a perda de água para qualquer plantio a ser estudado (evapotranspiração da cultura – ET_c), bem como desenvolver novos coeficientes da cultura (K_c), através da relação ET_c/ET_o. Dentre várias metodologias, a equação de Penman-Monteith destaca-se como o método padrão para obtenção da ET_o, sendo largamente utilizada em várias pesquisas desde sua formulação em 1948, por Penman, sendo melhorada por Monteith em 1965 (PENMAN, 1948; MONTEITH, 1965; ALLEN et al., 1989; ALLEN et al., 1998; PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002; ASCE-EWRI, 2005; SILVA et al., 2011; EVETT et al., 2012).

2.3 Evapotranspiração da Cultura (ET_c) e Coeficiente da Cultura (K_c)

A evapotranspiração da cultura (ET_c) é apresentada como a ET real de um plantio específico diferenciado da cultura de referência, em condições ideais para seu desenvolvimento, livre de restrição hídrica, pragas, doenças e com excelente fertilidade no solo, representando o requerimento hídrico durante o desenvolvimento da cultura (HOU et al., 2010). Os procedimentos para estimar a ET_c foram introduzidos no boletim 24 (DOORENBOS; KASSAM, 1979), tornando-se padrão e largamente seguido. Sua determinação dá-se através das características típicas, fisiológicas e morfológicas da cultura ao longo do crescimento da superfície do dossel. A mensuração da ET_c pode ser de maneira direta, através do método de balanço de energia, derivado de estudos do balanço de água no solo através de lisímetros, ou de maneira indireta, através de dados meteorológicos e da cultura cultivada (ALLEN et al., 1998; LIU; ZHAGH; ZHANG, 2002; ALLEN, 2005; ASCE-EWRI, 2005; ORTEGA-FARIAS et al., 2006).

Os valores de ET_c podem variar de um cultivo para o outro de acordo com a disponibilidade hídrica da atmosfera ou mesmo através da radiação incidente no dossel foliar, em uma mesma região ou em localidades diferentes. Na região de Rio Largo, em cultivo de cana-de-açúcar Lyra et al. (2007a) observaram uma pequena diferença na ET_c acumulada calculada pela metodologia proposta pelo boletim FAO 56, obtendo 2050 e 1950 mm para o cultivo 1 e 2 respectivamente, com média de 4,6 e 4,3 mm d⁻¹. Em um cultivo comercial de cana-de-açúcar na região do Vale do São Francisco, Juazeiro – BA, Silva et al. (2012b) obtiveram requerimento hídrico total de 1710 mm, medido através do balanço de energia por

razão de Bowen, com ET_c média de $4,7 \text{ mm d}^{-1}$. Essas médias encontram-se no intervalo de ET_c obtida por Watanabe et al. (2004) que variou de 2 a 6 mm d^{-1} durante a estação chuvosa na região da Tailândia, para um plantio de cana-de-açúcar. Os valores de ET_c são essenciais, pois através dele, juntamente com ET_o , pode determinar-se o coeficiente da cultura (K_c) para a cana-açúcar (INMAM-BAMBER; MCGLINCHEY, 2003; SILVA et al., 2012b).

O conceito de coeficiente da cultura (K_c) foi introduzido por Jensen (1968), caracterizando-se como o efeito relativo da resistência do movimento da água no solo até as superfícies de evaporação, ou também classificada como a quantidade relativa de energia disponível comparada com a cultura de referência. Esse conceito é amplamente discutido pela FAO no boletim nº 56 de irrigação e drenagem, sendo o K_c dependente da rugosidade, área foliar e albedo da superfície vegetativa cultivada, em relação às características da cultura de referência, definido como a razão entre ET_c e ET_o (ALLEN et al., 1998; ALLEN et al., 2011a). Os valores tabelados do K_c para várias culturas, encontram-se disponíveis no boletim FAO 56, podendo ser calculados para as regiões de estudo, de acordo com as condições atmosféricas, determinando os coeficientes da cultura único (K_c único) e dual (K_c dual) (ALLEN et al., 1998; LYRA et al., 2007a; LYRA et al., 2007b; EVETT et al., 2012; SILVA et al., 2012b).

O K_c “único” representa o efeito da transpiração da cultura e evaporação do solo combinados em um único valor. Esses valores são largamente utilizados para manejo da irrigação em grandes cultivos. Voltado ao âmbito de pesquisa, o K_c “dual” leva em consideração o efeito da transpiração e evaporação separadamente, classificando-os em dois coeficientes: coeficiente basal da cultura (K_{cb}), que descreve a transpiração das plantas e o coeficiente de evaporação do solo (K_e), correspondendo à taxa de perda de água no solo. Os valores tabelados do K_{cb} também podem ser encontrados no boletim FAO 56 para diversas culturas agrícolas ou calculados pelas metodologias apresentadas no boletim, para cada fase de crescimento, variando de acordo com o molhamento da superfície do solo, especialmente quando a cobertura do solo é pouca (ALLEN et al., 1998; ALLEN, 2000; ALLEN et al, 2005; LYRA et al, 2007b; MEDEIROS, 2009). Outro fator que implica na variação do K_c “dual” é aplicado à dependência da cobertura das plantas em relação à evaporação, onde a evaporação do solo decai de acordo com o aumento do sombreamento decorrente do aumento da taxa de cobertura, variando os valores de K_e (KASSAM; SMITH, 2001).

O coeficiente da cultura pode variar também de acordo com a textura do solo, já que há uma relação entre a disponibilidade hídrica e o aproveitamento de água pelas plantas. Em

cultivo de cana-de-açúcar, na região de Campos dos Goytacazes-RJ, Lyra et al. (2012) observaram que o Kc no estágio inicial de desenvolvimento variou quanto à textura do solo, onde solos de textura fina apresentaram um maior Kc. Esse fator viabilizou uma melhor retenção de água para aproveitamento das plantas. A variação do Kc também está dependente das condições atmosféricas e hídricas do solo. Plantios em sequeiro tendem a possuir um Kc menor que cultivos irrigados, ou seja, o aumento do coeficiente está dependente da magnitude das chuvas, umidade relativa do ar, da ETo, velocidade do vento e do crescimento do dossel da planta (INMAN-BAMBER; MCGLINCHEY, 2003; WATANABE et al., 2004; LYRA et al., 2007a).

2.4 Evapotranspiração Real da cultura (ETR) e balanço de água no solo

A evapotranspiração real demonstra a real quantidade de água perdida pelas plantas no ambiente com presença de pragas, doenças, com restrição hídrica, etc.. Diferente da ETc, a ETR é determinada em qualquer ambiente, seja ele em condições ideais ou extremas, ou em períodos que afetem o crescimento em potencial das plantas. Nesse procedimento de cálculo dessa variável destaca-se o aparecimento do coeficiente de estresse hídrico (Ks), que descreve o efeito desse estresse na transpiração da cultura estudada. Noilhan e Planton (1989) descrevem o Ks como sendo uma variação diária da umidade do solo, de acordo com os parâmetros de umidade na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente. Allen et al. (1998) descrevem o Ks de acordo com as propriedades físicas do solo, equacionando-o através do conteúdo de água no solo real e total, juntamente com a depleção. Porém, esse coeficiente pode ser descrito também como a razão entre a evapotranspiração atual e a evapotranspiração potencial (NULLET; GIAMBELLUCA, 1988). O valor do Ks varia de zero (quando existe um déficit hídrico limitante para o crescimento das plantas) até 1 (sem déficit hídrico).

Lhomme; Gomez; Jaramillo (1984) descrevem a evapotranspiração real de acordo com o conteúdo de água existente no solo, através de uma demanda hídrica no solo suficiente para atender os processos de absorção de água pela planta. Desse modo, a ETR será igual à ETc quando houver reserva hídrica ideal, suficiente para atender o desenvolvimento da cultura. Nullet e Giambelluca (1988) por sua vez, adotaram um fator para determinar o déficit hídrico existente no solo, classificando-o como ponto crítico (PC), sendo este dependente da evapotranspiração potencial e do conteúdo de água no solo, onde a ETR equivalerá à evapotranspiração potencial até o conteúdo de água chegar ao PC.

O sistema solo-planta-atmosfera (SSPA) é visto como um continuum em que os fluxos de água redistribuem-se de acordo com o gradiente de potencial de água no solo, onde o fluxo de entrada de água na forma de irrigação e/ou precipitação provoca uma alteração posterior da quantidade de água no solo e que a mesma influencia nos processos físicos e fisiológicos do SSPA, sendo importante fator de crescimento, desenvolvimento e rendimento das culturas nas áreas agrícolas (PANIGRAHI; PANDA, 2003; EITZINGER et al., 2003). Dentre os métodos de determinação da água disponível no solo, destacam-se aqueles com quantificação da quantidade de água no solo em campo, como o método gravimétrico, sonda de nêutrons e o método da técnica da reflectometria no domínio do tempo (TDR), sendo este último o método de determinação *in situ* com maior utilização em pesquisa para determinação da ETR, porém um método dispendioso quanto à metodologia e oneroso (MASTRORILLI et al., 1998; NOBORIO, 2001; JONES et al., 2002; CICHOTA; LIER, 2004; COELHO; VELLAME; COELHO FILHO et al., 2005).

Como forma de substituição dessas metodologias de campo, modelos matemáticos tem sido desenvolvidos e utilizados para simular o processo dinâmico do movimento da água no solo, através da interação de variáveis como clima, cultura cultivada, solo e manejo agrícola, visando melhorar a eficiência da utilização da água e aumentar os rendimentos para os agricultores. Tais modelos podem ser utilizados em sua forma original, adaptados ou desenvolvidos novas metodologias derivadas dos modelos originais para tratar-se de casos específicos, podendo estar em formatos conceituais ou computacionais (THORNTHWAITE; MATHER, 1955; RITCHIE, 1972; LHOMME; GOMEZ; JARAMILLO, 1984; FARIA; MADRAMOODOO, 1996; CAMPBELL; DIAZ, 1988; NULLET; GIAMBELLUCA, 1988; RUSHTON; EILERS; CARTER, 2006).

Thornthwaite e Mather (1955) desenvolveram um modelo de balanço hídrico climatológico visando à determinação do regime hídrico em uma localidade qualquer, sem que haja necessidade de medidas diretas da umidade do solo, necessitando-se apenas a definição do armazenamento máximo de água no solo, definida como a capacidade de água disponível (CAD), da precipitação pluvial total, bem como a estimativa da evapotranspiração potencial, permitindo a obtenção da ETR. Modificações propostas a partir deste modelo foram elaboradas, simplificando e aumentando a eficiência dos cálculos, com aceitabilidade para determinação do balanço hídrico para as principais culturas cultivadas no Brasil (PEREIRA, 2005). Lhomme; Gomez; Jaramillo (1984) apresentaram um modelo de cálculo do balanço

hídrico, simulando a evolução desse balanço em culturas perenes, visando caracterizar melhor as condições de abastecimento hídrico para as plantas.

Ritchie (1972) apresentou um modelo para prever evaporação diária nas linhas de cultivos com cobertura incompleta, destacando o fato que o suprimento de água para as raízes das plantas não é limitada e que a cultura não tenha entrado em estado avançado de maturação ou senescência, sendo o modelo calculado com base nos componentes da superfície do solo e da planta, evaporação potencial, chuva e saldo de radiação acima da cultura. Esse modelo foi utilizado por Zhao; Feng; Chen (2004) para determinação da evaporação do solo, juntamente com a obtenção da transpiração das folhas pelo método de Penman-Monteith, para simular o balanço de água no solo com a cultura da alfafa no semiárido chinês, observando-se uma viabilidade da combinação dos parâmetros medidos, para gerar variações do conteúdo de água no solo.

Nullet e Giambelluca (1988) propuseram um modelo para análise do risco de seca nas ilhas Cook, no pacífico, através da razão entre a ETR e a evapotranspiração potencial, visando observar o período de seca e aprimorar o período de manejo e desenvolvimento agrícola. Brito (2009) objetivando analisar épocas de semeaduras da cultura do milho, propôs uma modificação do modelo descrito por Nullet e Giambelluca (1988), permitindo uma determinação de um calendário de semeadura para a região de Arapiraca, Alagoas. As modificações podem ser necessárias para a elaboração de um novo modelo, já que ocorrem variações temporais em cada região de estudo, podendo os modelos originais sub/superestimar os dados em questão.

Campbell e Diaz (1988) elaboraram um modelo simplificado para balanço de água no solo, através da junção de vários outros modelos (incluindo o modelo proposto por Ritchie, 1972), visando prever a evapotranspiração da cultura em várias épocas, separando o solo em diversas camadas, através de programação computacional. Esses autores adotaram dados de entrada como interceptação das chuvas pelo dossel da cultura, escoamento superficial, infiltração, percolação profunda, evapotranspiração potencial, evaporação da superfície do solo, transpiração das plantas, crescimento radicular e captação de água pelas raízes. O modelo permitiu simplificar uma gama de metodologias complexas que possuíam o mesmo objetivo.

Monteith em 1965 propôs um modelo baseado na interação de energia entre a planta e a atmosfera, tratando o dossel foliar como uma folha gigante (big leaf), utilizando uma

analogia elétrica para tratar o movimento vertical do vapor d'água no continuum SSPA (MONTEITH, 1965; ALLEN et al., 1998). Porém, esse modelo não é capaz de estimar com eficiência a evapotranspiração em ambientes com plantios pequenos ou em áreas que ocorrem grandes espaços entre os cultivos, onde há locais com ET e outros apenas com evaporação do solo (KATO et al., 2004). Visando contabilizar essa evaporação perdida, Shuttleworth e Wallace (1985) propuseram determinar estes componentes (evaporação e transpiração) separadamente no SSPA. Os modelos no SSPA fornecem informação útil para o gerenciamento de qualquer cultura implantada no campo, seja o ambiente irrigado ou sequeiro (GHIBERTO et al., 2011). As aplicações desses diversos modelos visam à contabilidade dos fatores no armazenamento de água no solo é dado pela entrada e saída de água em um volume de solo, durante certo período de tempo, onde o balanço de água pode ser descrito através da equação da conservação das massas no perfil do solo, como segue (MASTRORILLI et al., 1998; ALLEN et al, 1998; ZHAO; FENG; CHEN, 2004; MAVI; TUPPER, 2004):

$$P + I - D + CR - ETR \pm R \pm \Delta H_z = 0 \quad (1)$$

onde: P é a precipitação pluvial, I é a irrigação, D é a drenagem, CR é a ascensão capilar, ETR é a evapotranspiração real da cultura, R é o escoamento e ΔH é variação no armazenamento de água no solo até uma profundidade Z.

Alguns desses componentes podem ser desprezados durante o cálculo do armazenamento de água no solo, outros modelados através de fórmulas empíricas, ou simplificados para utilização no balanço de água. Campbell e Diaz (1988) utilizaram-se de fórmulas empíricas para calcular o escoamento superficial através dos dados de precipitação, baseando-se que esta variável aumenta de acordo com o maior incremento das chuvas, na medida em que a precipitação venha ser maior que a infiltração e o armazenamento de água no solo. Pereira (2005), visando à melhoria e simplificação do modelo de balanço hídrico de Thornthwaite e Mather (1955), conseguiu retirar o negativo acumulado sem causar perdas nos resultados finais. Isso mostra que todos os modelos supracitados seguem o ponto inicial do balanço de água no solo, em que os dados de entrada (precipitação pluvial, irrigação, ascensão capilar) e de saída (drenagem e evapotranspiração real da cultura) regem a variação de armazenamento de água no solo. Portanto, essa variação não está dependente tão somente dos fatores ambientais, mas como também dos fatores físicos do solo, do manejo cultural, manejo de irrigação (quando necessitar-se) e desenvolvimento da cultura ao longo do seu ciclo.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

O estudo foi conduzido na área experimental da Unidade Acadêmica Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas, na região de Rio Largo (09°28'02" S; 35°49'43" W; 127 m), localizada nos Tabuleiros Costeiros de Alagoas em um Latossolo amarelo coeso argissólico de textura médio-argilosa. As características físico-hídricas do solo constaram de densidade do solo ($1,50 \text{ Kg m}^{-3}$), porosidade total do solo (42,3%) e velocidade básica de infiltração (52 mm h^{-1}), foram determinadas na própria instituição (CARVALHO, 2003). O conteúdo de água no solo encontra-se na Tabela 1.

Tabela 1- Umidade do solo nas profundidades de 0-30 e 30-60cm.

Profundidade (em cm)	$\theta_{cc} (\text{m}^3 \text{ m}^{-3})$	$\theta_{pm} (\text{m}^3 \text{ m}^{-3})$
0 – 30	0,233	0,140
30 – 60	0,281	0,169

Fonte: Carvalho, 2003.

A variedade RB92579 foi plantada em 17/09/05 e colhida 12/11/06, totalizando um ciclo de 422 dias, numa área experimental de 1,0ha, em regime de sequeiro. As parcelas foram constituídas de 11 linhas de 21 m de comprimento, com espaçamento de um metro entre linhas, plantando-se 15 gemas por metro linear. No manejo nutricional da cultura, aplicou-se adubação de fundação, adicionando-se 1000 kg ha^{-1} da fórmula 10-20-20, correspondendo à dose de 100 kg ha^{-1} de N, 200 kg ha^{-1} de P_2O_5 e 200 kg ha^{-1} de K_2O . Posteriormente, fez-se adubação de cobertura, adicionando-se 40, 20 e 30 kg ha^{-1} de sulfato de cobre, manganês e zinco, respectivamente, misturados a 90 kg de torta de filtro para facilitar a distribuição.

3.2 Observações biométricas da cultura

O início das avaliações biométricas deu-se aos 60 dias após o plantio (DAP, 15/11/05), estendendo até os 411 DAP (01/11/06), feitas mensalmente, onde se realizaram avaliações da altura do dossel da cultura, número de folhas expandidas, comprimento e largura das folhas. A área foliar (AF) de cada planta foi determinada baseada nas medidas biométricas e o

cálculo realizado de acordo com a relação proposta por Hermann e Camara (1999), de acordo com a seguinte equação:

$$AF = (0,75.C.L).(NF + 2) \quad (2)$$

em que, C e L são comprimento e largura (folha +3), respectivamente; NF é o número de folhas expandidas com área verde maior que 20% e 0,75 é um fator de correção de forma da folha.

Logo após, estimou-se o Índice de Área Foliar (IAF), expressando a relação entre a área foliar da planta e a área de solo ocupada por ela ($0,067 \text{ m}^2 \text{ planta}^{-1}$). A variação do IAF e da altura da planta (h_c) no ciclo da cultura foi obtida pela equação de Boltzmann, em que foi ajustada para as observações do IAF e h_c em função dos dias após o plantio (DAP), como segue:

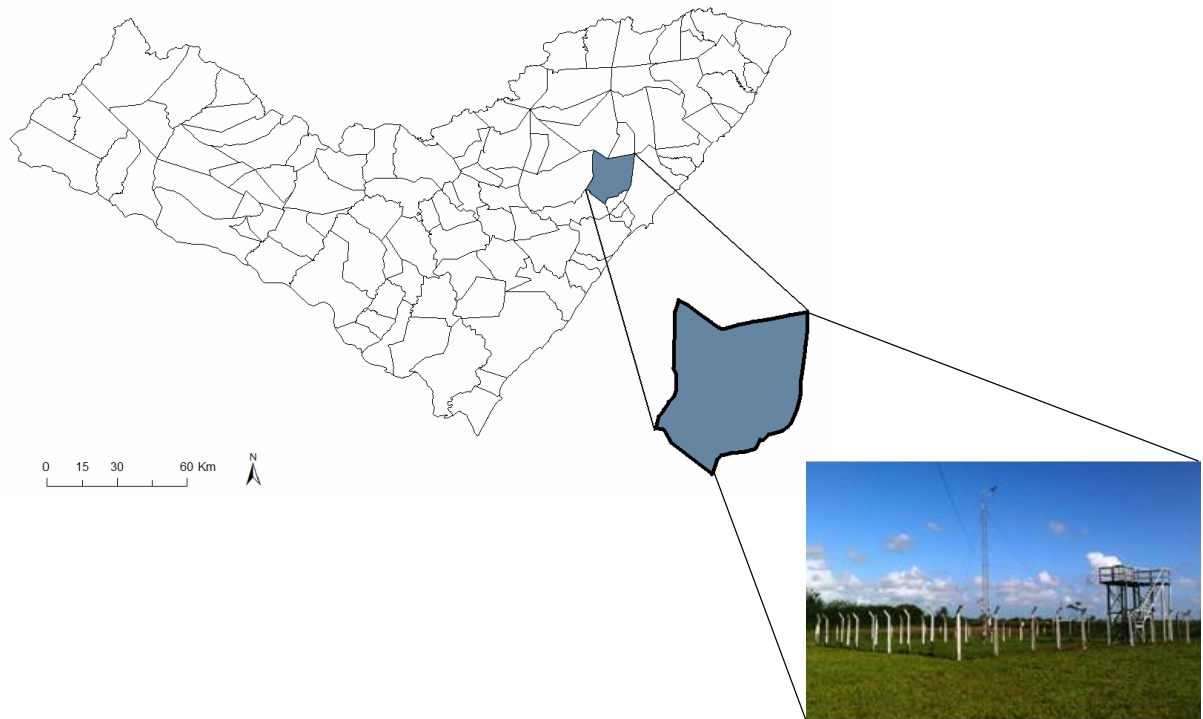
$$Y = \frac{-a}{1 + \exp((x-b)/c)} + a \quad (3)$$

em que: Y é o índice de área foliar (IAF) ou altura da planta (h_c) diário, “a” é o IAF/ h_c máximo, “x” é o DAP, “b” é o valor central do DAP e “c” é a faixa do DAP onde os valores de IAF/ h_c variam.

3.3 Observações Agrometeorológicas

Os elementos meteorológicos irradiância solar global, temperatura do ar e umidade relativa do ar e o índice de área foliar foram necessários para estimar o saldo de radiação (R_n). Estes foram obtidos na estação agrometeorológica do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas, localizada a 200 m do experimento (Figura 1). Os elementos necessários para a estimativa da ETR foram oriundos da mesma estação agrometeorológica, coletando-se os seguintes dados: temperatura (T, em °C) máximas, mínimas e diurnas, umidade relativa do ar (UR, %) máximas, mínimas e diurnas, velocidade do vento (u, m s^{-1}), instalados a 2 e 10 m de altura e precipitação pluvial (P, em mm), a 1,5 m de altura.

Figura 1 – Localização geográfica de Rio Largo-AL e vista da estação agrometeorológica.



Fonte: (Adaptado IBGE, 2012)

3.4 Estimativas da evapotranspiração real

A evapotranspiração real (ETR) foi estimada por cinco métodos, em escala de tempo quinidial (de cinco em cinco dias) avaliando-se os melhores resultados para as condições edafoclimáticas locais para o cultivo de cana-de-açúcar. Os métodos são descritos a seguir:

3.4.1 ETR 1 - Método Penman-Monteith FAO Kc dual (ALLEN et al., 1998)

O cálculo da evapotranspiração real (ETR), em mm, foi realizado de acordo com a seguinte equação:

$$ETR_1 = ETo.Kc_{ajust} = ETo.(Ks.Kcb + Ke) \quad (4)$$

em que ETo é a evapotranspiração de referência e Kc ajust é o valor do coeficiente da cultura ajustado para uma condição de umidade do solo variável, Kcb é o coeficiente da cultura basal e Ke é o coeficiente da evaporação da superfície. O diferencial nesse ajuste é a consideração de um fator de depleção da transpiração (Ks) na equação, dependente do conteúdo de água no solo. O Ks foi determinado através da seguinte equação:

$$K_s = \frac{TAW - Dr}{(1 - p)TAW} \quad (5)$$

em que Dr é a depleção da umidade na zona radicular (em mm); TAW é o total de água disponível na zona radicular (em mm) e p é a fração de TAW que a cultura pode extrair na zona radicular sem sofrer estresse, sendo considerado 65% para a cultura da cana-de-açúcar, de acordo com o boletim FAO 56. O TAW foi obtido entre a diferença da umidade do solo na capacidade de campo e o ponto de murcha permanente a uma determinada profundidade efetiva do sistema radicular (0.60 m). O procedimento do cálculo da evapotranspiração de referência (ETo) segue de acordo com o método de Penman-Monteith FAO 56, que leva em consideração as condições ambientais e atmosféricas. Para o cálculo do saldo de radiação (R_n) nesse procedimento, utilizou-se o produto da radiação global (R_g) por um fator obtido experimentalmente (0,572) (FERREIRA JUNIOR, 2010). Para determinação da K_c ajust, utilizou-se o método do coeficiente da cultura “dual”, descrita pela junção da transpiração das plantas (relacionado ao K_{cb}) e à evaporação da superfície do solo (K_e), multiplicando estes pela ETo . Os valores de K_{cb} são sumarizados no Boletim FAO 56, correspondendo a 0,15 para o período inicial; 1,20 referente ao período intermediário e 0,70 no período final. Porém, esses valores foram ajustados levando-se em consideração a velocidade do vento, umidade relativa do ar e a altura da planta. O K_e varia de acordo com a taxa de molhamento do solo, tornando-se máximo quando a camada superficial encontra-se molhada após um período de chuva ou irrigação, decaindo de acordo com o secamento do solo.

Ainda foram determinados os valores de evaporação (E) e transpiração (T) separadamente, como segue:

$$E = K_e.ETo \quad (6)$$

$$T = ETR_1 - E \quad (7)$$

Determinou-se o escoamento superficial, a partir de um modelo semi-empírico descrito por Campbell e Diaz (1988), para cálculo da chuva efetiva. Esse modelo é baseado em que o escoamento aumenta de acordo com o aumento da precipitação diária, na medida em que esta venha ser maior que a infiltração e o armazenamento de água no solo. Detalhamento geral sobre o procedimento desta metodologia e os procedimentos sobre obtenção da ETR_1 são encontradas em Allen et al., (1998) e Medeiros (2009).

3.4.2 ETR 2 - Método da água disponível (NULLET; GIAMBELLUCA, 1988)

Esse consiste na utilização do modelo original proposto por Nullet e Giambelluca (1988) e modificações deste. A metodologia original é definida através da seguinte relação:

$$\begin{aligned} ETR_2 &= ETC & , \text{ se } ARM_{i-1} \geq PC; \\ ETR_2 &= ARM_{i-1} [1 - \exp(-ETC / PC)] & , \text{ se } ARM_{i-1} < PC \end{aligned} \quad (8)$$

em que: ARM_{i-1} é o armazenamento de água no solo do dia anterior (em mm) e PC é o ponto crítico, caracterizado como o ponto onde a cultura apresentará deficiência na absorção de água do solo. Para esse estudo recomendou-se a utilização do PC quando o armazenamento de água no solo encontrava-se abaixo da capacidade de água disponível no solo (CAD- em mm).

O armazenamento do dia em questão (ARM_i) foi obtido através da seguinte relação:

$$\begin{aligned} ARM_i &= CAD, & \text{ se } ARM_{i-1} + P_i - ETR_{2i} \geq CAD; \\ ARM_i &= 0, & \text{ se } ARM_{i-1} + P_i - ETR_{2i} < 0; \\ ARM_i &= ARM_{i-1} + P_i - ETR_{2i}, & \text{ se } 0 < ARM_{i-1} < CAD \end{aligned} \quad (9)$$

em que P_i é a precipitação (em mm) ocorrida no dia e ETR_{2i} é a evapotranspiração real do dia.

A CAD foi obtida em base diária através da seguinte fórmula:

$$CAD = 1000(\theta_{cc} - \theta_{pm})Zr \quad (10)$$

onde θ_{cc} e θ_{pm} é o conteúdo de água no solo na capacidade de campo e ponto de murcha, respectivamente e Zr é a profundidade da raiz no perfil do solo. Zr foi calculado por três diferentes metodologias: a primeira (Zr_1) com Zr igual a 0,60 m; a segunda (Zr_2) utilizou-se da metodologia descrita por Allen et al. (1998) para determinação da profundidade da raiz, com utilização do coeficiente da cultura (K_c) e a terceira (Zr_3), uma modificação desta segunda metodologia, utilizando-se os dados de IAF estimados pela sigmóide de Boltzmann, como descritos:

$$Zr_2 = \max \left[\left(\frac{Kc_i - Kc_{ini}}{Kc_{med} - Kc_{ini}} \right) (Zr_{\max} - Zr_{\min}) + Zr_{\min}, Zr_{i-1} \right] \quad (11)$$

$$Zr_3 = \max \left[\left(\frac{IAF_i - IAF_{ini}}{IAF_{fim} - IAF_{ini}} \right) (Zr_{\max} - Zr_{\min}) + Zr_{\min}, Zr_{i-1} \right] \quad (12)$$

em que Kc_i , Kc_{ini} e Kc_{med} correspondem ao coeficiente da cultura no determinado dia, inicial e médio, respectivamente; IAF_i , IAF_{ini} e IAF_{fim} correspondem ao índice de área foliar do dia, inicial e final, respectivamente; Zr_{i-1} , $Zr_{\min}$, $Zr_{\max}$, são respectivamente as profundidades da raiz do dia anterior, mínimo (0,10 m) e máximo (0,60 m).

Seguido isto, adotou-se uma nomenclatura para cada ETR 2 e ARM 2, atribuída de acordo com o método de determinação da Zr , detalhado na Tabela 2:

Tabela 2 – Variação da nomenclatura de ETR estimada pelo método do balanço de água proposto por Nullet e Giambelluca (1988) (ETR 2) em função dos métodos de determinação da profundidade da raiz (Zr).

Nomenclatura de ETR ₂	Variantes do produto
ETR 2,a e ARM 2,a	$CAD = 1000(\theta_{cc} - \theta_{pm})Zr_1$
ETR 2,b e ARM 2,b	$CAD = 1000(\theta_{cc} - \theta_{pm})Zr_2$
ETR 2,c e ARM 2,c	$CAD = 1000(\theta_{cc} - \theta_{pm})Zr_3$

Fonte: Autor, 2012.

3.4.3 ETR 3–Método do Balanço Hídrico de cultivo (THORNTHWAITE; MATHER, 1955)

Essa metodologia admite que a ETR seja calculada através do balanço hídrico proposto por Thornthwaite e Mather (1955) [detalhamento descrito por PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS (2002)], onde a capacidade de água disponível (CAD) foi obtida através do diferencial da umidade do solo na capacidade de campo e no ponto de murcha, em fator da profundidade do sistema radicular (0,60 m), através da seguinte relação:

$$\begin{aligned} ETR_3 &= P + |ALT|, & \text{se } P - ET_c < 0 \\ ETR_3 &= ET_c, & \text{se } P - ET_c > 0 \end{aligned} \quad (13)$$

em que P-ETc é a diferença entre a precipitação e a evapotranspiração da cultura e o ALT é definido como a alteração no armazenamento do dia em questão pela alteração do dia anterior. O armazenamento do dia (ARM) foi calculado de acordo com a taxa de molhamento ocasionado pela precipitação pluvial, sendo calculado para profundidade total do perfil do solo (0,60 m) e para o perfil de crescimento do sistema radicular (ARM*), fazendo uso da equação 12 para determinação da CAD ao longo do perfil. Detalhamentos sobre o procedimento do ARM são descritos na equação 15 e demais cálculos encontrados em Pereira; Angelocci; Sentelhas (2002).

$$\begin{aligned}
 ARM_3 &= CAD \exp(NEG.ACUM / CAD) && \text{se } P-ETc < 0 \\
 ARM_3 &= CAD && \text{se } ARM_{i-1} + (P-ETc) > CAD \\
 ARM_3 &= ARM_{i-1} + (P - ETc), && \text{se } ARM_{i-1} + (P-ETc) < CAD
 \end{aligned} \tag{14}$$

onde: NEG. ACUM._{i-1} é o negativo acumulado do dia anterior e ARM_{i-1} é o armazenamento do dia anterior. Compararam-se ainda dos dados de ARM 1, ARM 2, e ARM 3 com os obtidos no local de estudo com auxílio do TDR para as profundidades de 0-30 cm e 30-60 cm.

3.4.4 ETR 4 – Método Penman-Monteith FAO Kc único (ALLEN et al., 1998)

Semelhante ao ETR 1, por esse método, calcula-se primeiramente a evapotranspiração de referência (ET_o), multiplicando este pelo coeficiente da cultura (K_c) com propósito de obter-se a ET_c. Logo após, realizou-se o produto entre a ET_c e o coeficiente de redução por déficit de água no solo (K_s) para obtenção de ETR 4, como apresentado:

$$ETR_4 = (ET_o.K_c).K_s = ET_c.K_s \tag{15}$$

O coeficiente da cultura utilizado no cálculo da ET_c foi ajustado às condições locais, onde o K_{cini} foi considerado através do intervalo de tempo entre os eventos de chuva e sua magnitude e a evapotranspiração de referência (ET_o), baseados na metodologia do modelo gráfico sugerido no boletim FAO-56. Para o ajuste de K_{cint} e K_{cfinal} fez-se útil as seguintes equações:

$$Kc_{int} = Kc_{int(tab)} + [0,04(u_2 - 2) - 0,04(UR_{min} - 45)] \left(\frac{h_1}{3} \right)^{0,3} \quad (16)$$

$$Kc_{final} = Kc_{final(tab)} + [0,04(u_2 - 2) - 0,04(UR_{min} - 45)] \left(\frac{h_2}{3} \right)^{0,3} \quad (17)$$

em que $Kc_{int(tab)}$ e $Kc_{final(tab)}$ são, respectivamente, os valores do coeficiente da cultura tabelado no estágio intermediário (1,25) e final (0,75), h_1 e h_2 são as alturas médias durante as fases intermediária e final. Os coeficientes da cultura foram interpolados para a cultura da cana-de-açúcar em função do comprimento das fases de desenvolvimento para um ciclo de 422 dias, descritos na Tabela 3.

Tabela 3 – Duração e período das fases de desenvolvimento para o cultivo da cana-de-açúcar em Rio Largo-AL, no período de 2005 e 2006.

Fase de Desenvolvimento	Período	Duração (dias)
Inicial (I)	17/09/05 a 30/10/05	44
Crescimento (II)	31/10/05 a 31/12/05	62
Intermediário (III)	01/01/06 a 12/07/06	193
Final (IV)	13/07/06 a 12/11/06	123

Fonte: Autor, 2012.

Ao final, tem-se a multiplicação da ET_c pelo K_s , a fim de se obter o ETR 4. Para a determinação do coeficiente de redução (K_s), utilizou-se a razão entre a evapotranspiração real (ETR) e evapotranspiração da cultura (ET_c) nas metodologias de Nullet e Giambelluca original (K_{s1}) e Thornthwaite e Mather (K_{s2}). Seguido isto, adotou-se uma nomenclatura para cada ETR , atribuída de acordo com o método de determinação do K_s , detalhado na Tabela 4.

Tabela 4 – Variação da nomenclatura de ETR estimada pelo método do K_c único (ETR_4) em função dos métodos de determinação do coeficiente de redução de água no solo (K_s)

Nomenclatura de ETR_4	Variantes do produto
$ETR_{4,a}$	$ET_c * K_{s1}$
$ETR_{4,b}$	$ET_c * K_{s2}$

Fonte: Autor, 2012.

3.4.5 ETR 5 – Método de Penman-Monteith com Resistência da Superfície do Dossel (ALLEN et al., 1998)

A equação original de Penman-Monteith está descrita abaixo:

$$ETR_5 = \frac{1}{\lambda} \frac{\Delta(R_n - G) + 86400 \rho_a c_p DPV / r_a}{\left(\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a} \right) \right)} \quad (18)$$

em que ETR 5 é a evapotranspiração real (mm d⁻¹); R_n é o saldo de radiação (MJ m⁻² d⁻¹); G é o fluxo de calor no solo (MJ m⁻² d⁻¹); c_p é o calor específico do ar seco (0,001013 MJ kg⁻¹ °C⁻¹); DVP (e_s-e_a, kPa) é o déficit de pressão de vapor da água; ρ_a é a densidade do ar (kg m⁻³); γ é a constante psicrométrica; λ é o calor latente de vaporização (2,45 MJ kg⁻¹); r_s é a resistência da superfície do dossel (s m⁻¹) e r_a é a resistência aerodinâmica (s m⁻¹). O procedimento de cálculo para essas variáveis são encontradas em Allen et al. (1998).

O saldo de radiação para a cultura da cana-de-açúcar utilizado nesse método foi obtido em função de R_g e IAF, por meio de dados experimentais (SOUZA, 2011¹). A equação apresentou ajuste elevado, com coeficiente de determinação (R²) igual a 0,98 e está descrito pela seguinte equação:

$$R_n = -1,874 + 0,640R_g + 0,471IAF \quad (19)$$

O procedimento de cálculo da resistência aerodinâmica (r_a) é descrita por Jensen et al. (1990) e tem a seguinte fórmula:

$$r_a = \frac{\ln\left(\frac{Z-d}{Zom}\right) \ln\left(\frac{Z-d}{Zoh}\right)}{k^2 u} \quad (20)$$

em que, Z é a altura da medida da velocidade do vento (10 m); d é o deslocamento do plano zero (m); Zom é o comprimento de rugosidade que rege a transferência de momento (m); Zoh é o comprimento de rugosidade governado pela transferência de calor e vapor (m); k é a constante de Von Karman (0,41) e u é a velocidade do vento a uma altura de 10 m (m s⁻¹).

¹ Comunicação pessoal. Laboratório de Agrometeorologia e Radiometria Solar da Universidade Federal de Alagoas (LARAS/UFAL)

Os parâmetros de d , Zom e Zoh foram estimados pelas relações descritas no boletim FAO-56:

$$d = \frac{2}{3}h_c \quad (21)$$

$$Zom = 0,123h_c \quad (22)$$

$$Zoh = 0,1Zom \quad (23)$$

A estimativa da resistência da cultura (r_s) foi adaptada seguindo metodologia descrita no boletim FAO 56 (ALLEN et al. 1998), em que:

$$r_s = \begin{cases} IAF < 1 \Rightarrow 200s.m^{-1} \\ IAF \geq 1 \Rightarrow \frac{r_l}{0,5IAF} \end{cases} \quad (24)$$

em que r_l é a resistência estomática da parte iluminada da folha, adotando-se 100 s m^{-1} . Valores de r_s abaixo de 70 s m^{-1} foram considerados iguais a 70 s m^{-1} .

3.5 Análise das estimativas

Para a evapotranspiração real foram realizadas as seguintes avaliações estatísticas:

3.5.1 Índice de Concordância

A aproximação dos dados estimados ao observado pode ser avaliada pelo afastamento ou aproximação dos pontos. Para quantificar matematicamente, Willmont (1981) desenvolveu um coeficiente designado de concordância, representado pela letra “d”, refletindo o grau de exatidão entre a variável observada e simulada. Os valores podem variar de zero, que indica a nulidade, a 1, indicando a perfeita exatidão.

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P'_i| + |O'_i|)^2} \right] \quad (25)$$

em que, N é o número de observações; P_i é o valor estimado; O_i é o valor observado; P'_i é o valor estimado, subtraído da média da variável observada; O'_i é o valor observado subtraído da média da variável observada.

3.5.2 Coeficiente de Correlação de Pearson

Os coeficientes foram gerados a partir de dados observados (eixo “x”) e estimados (eixo “y”) da evapotranspiração real forçados a passar pela origem, gerando o coeficiente angular da regressão linear simples (b) e o coeficiente de correlação de Pearson, através da equação do tipo $Y=b X$ (MORIASI et al., 2007).

3.5.3 Desvio Percentual

O desvio percentual (DP) foi utilizado para indicar a subestimativa (desvio negativo) e superestimativa (desvio positivo) entre os valores simulados e observados (TOJO-SOLER, 2004). O desvio de porcentagem é dado por:

$$DP = \frac{(Pi - Oi)}{Oi} 100 \quad (26)$$

3.5.4 Raiz Quadrada do Erro Médio

A Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE) é utilizada para mensurar o desempenho geral do modelo e sintetiza a diferença média entre os valores observados e estimados. A unidade da RMSE é a mesma utilizada pelas variáveis observadas e estimadas. O modelo é melhor ajustado quando a RMSE se aproxima de zero (LOAGUE; GREEN, 1991).

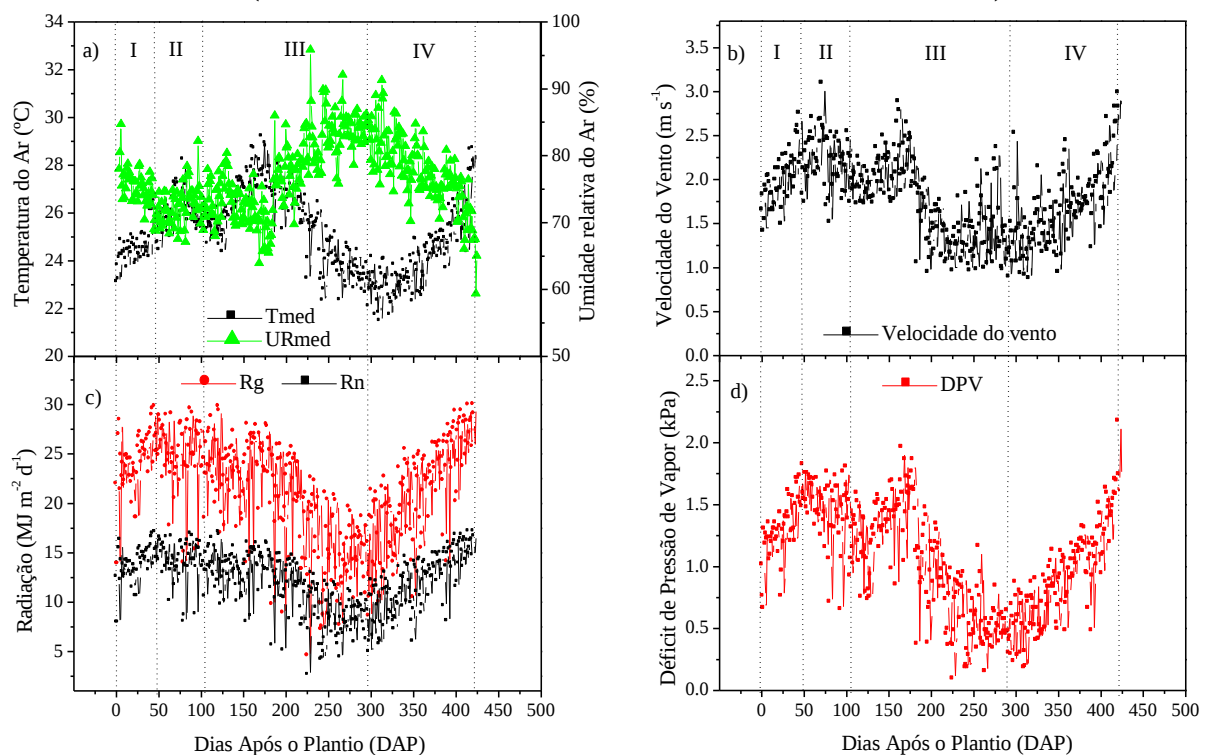
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Pi - Oi)^2} \quad (27)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Condições meteorológicas do cultivo

Os valores médios das variáveis meteorológicas (temperatura do ar, umidade do ar, velocidade do vento, radiação solar global, saldo de radiação, déficit de pressão de vapor), chuva efetiva e evapotranspiração de referência são demonstrados nas Figuras 2 e 3.

Figura 2 – Temperatura e umidade relativa do ar média (a), velocidade do vento (b) Radiação Global e Saldo de Radiação (c) e déficit de pressão de vapor (d) para um cultivo de cana-de-açúcar em Rio Largo-AL. Descrição das fases fenológicas adaptada para a cultura (I – inicial; II – crescimento; III – intermediário; IV – Final).

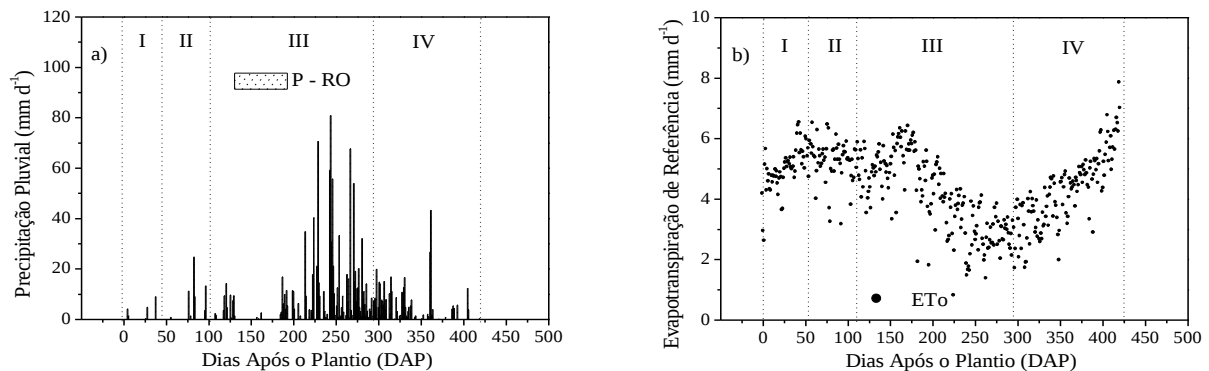


Fonte: Autor, 2012.

A fase I da cultura (inicial) ocorreu no período com baixos valores de temperatura do ar, velocidade do vento e com valores crescentes de radiação solar (Figura 2a, 2b e 2c). A umidade relativa do ar (Figura 2a) manteve-se decrescente durante esse período. Na fase subsequente, que é a de crescimento, houve um incremento da temperatura do ar, juntamente com o início do decréscimo da umidade relativa do ar (Figura 2a). O período intermediário (fase III) foi marcado por uma diminuição da radiação (Figura 2c), indicando menores temperaturas e aumento da umidade relativa do ar. Esse conjunto de fatores resultou em um decréscimo no déficit de pressão de vapor (DPV) na metade da fase III (Figura 2d). Uma tendência inversa é observada entre a temperatura e umidade do ar, devido ao aumento dos

índices pluviométricos (Figura 3a). Os períodos intermediário e final foram marcados pela diminuição das variáveis meteorológicas e do saldo de radiação, resultando em uma baixa ETo. Durante essa época houve uma maior disponibilidade hídrica para a cana-de-açúcar, com uma chuva efetiva de 1570,23 mm, totalizando 93,86% de chuvas para todo o ciclo de cultivo (Figura 3a).

Figura 3 – Chuva efetiva (P-RO) (a) e evapotranspiração de referência (b) para um cultivo de cana-de-açúcar em Rio Largo-AL. Descrição das fases fenológicas adaptada para a cultura (I – inicial; II – crescimento; III – intermediário; IV – Final).



Fonte: Autor, 2012.

Os valores mínimos e máximos para as variáveis meteorológicas, chuva efetiva e evapotranspiração de referência durante o período de cultivo de cana-de-açúcar são demonstradas na Tabela 5. Observa-se que durante o período inicial (Fase I) tem-se temperaturas (T_{ar}) variando de 23,1 (primeiro Dia Após o Plantio-DAP) a 26,6 °C (42 DAP) e a umidade relativa do ar (UR_{ar}) com comportamento inverso, variando de 69,1 (44 DAP) a 85,0 % (3 DAP). Observa-se ainda que o terceiro DAP foi marcado pelos valores mínimos do déficit de pressão de vapor ($DPV = 0,52$ kPa), velocidade do vento ($VV = 1,41$ m s⁻¹), saldo de radiação ($R_n = 7,92$ MJ m⁻²), radiação global ($R_g = 13,84$ MJ m⁻²) e de ETo (2,59 mm d⁻¹). Os valores máximos durante esse período para DPV, R_n , R_g e ETo foram encontrados no último dia para a Fase I (44 DAP). O máximo da VV foi observado durante o 43 DAP e a maior chuva efetiva durante o período inicial foi constatada aos 35 DAP (9,65 mm) em um total de 26,92 mm, correspondendo a 35,84% do total de chuva para essa época.

Na Fase II, que é a de crescimento, apresentou uma variação de T_{ar} de 24,4 (51 DAP) a 28,2 °C (79 DAP) e UR_{ar} de 67,4 (80 DAP) a 82,5 % (94 DAP). Durante o 94º DAP também ocorreram valores mínimos para DPV e ETo. Os máximos para essas variáveis foram respectivamente 1,59 kPa (79 DAP) e 6,49 mm d⁻¹ (60 DAP). Os valores máximos e mínimos da radiação global e do saldo de radiação foram observados durante os mesmos dias após o

plantio, com máximo aos 46 DAP e mínimo aos 80 DAP. A chuva efetiva total para esse período foi de 75,69 mm e cerca de 34% dessa chuva ocorreu no 80º DAP. O período intermediário apresentou a maior média da T_{ar} para todo ciclo de cultivo (29,2 °C aos 172 DAP) juntamente com UR_{ar} (96,2 % aos 226 DAP). Os valores mínimos para essas variáveis foram encontrados aos 298 e 166 DAP, para T_{ar} e UR_{ar} respectivamente. O mínimo do DPV para todo o cultivo de cana-de-açúcar foi observado durante a Fase III (0,11 kPa) aos 226 DAP, ocasionando menor valor da ETo. O máximo para DPV e ETo foram encontrados, respectivamente aos 176 e 172 DAP. A velocidade do vento mínima e máxima foram observadas aos 292 e 162 DAP, respectivamente.

Tabela 5 – Valores máximos e mínimos para temperatura e umidade relativa do ar média(T_{ar} e UR_{ar}), déficit de pressão de vapor (DPV), velocidade do vento (VV), saldo de radiação (Rn), radiação global (Rg), chuva efetiva (P-RO) e evapotranspiração de referência (ETo), para as fases Inicial (Fase I), Crescimento (Fase II), Intermediário (Fase III) e Final (Fase IV) para um cultivo de cana-de-açúcar em Rio Largo-AL, no período de Setembro de 2005 a Novembro de 2006.

	Fase I		Fase II		Fase III		Fase IV		Total
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	
$T_{ar}(^{\circ}C)$	23,1	26,6	24,4	28,2	22,1	29,2	21,5	28,7	-
$UR_{ar}(\%)$	69,1	85,0	67,4	82,5	64,2	96,2	59,7	91,6	-
DPV(kPa)	0,52	1,44	0,64	1,59	0,11	1,69	0,25	2,09	-
VV($m\ s^{-1}$)	1,41	2,60	1,51	3,09	0,89	2,88	0,87	2,98	-
Rn($MJ\ m^{-2}$)	7,92	16,90	7,97	17,04	2,58	17,04	5,70	17,14	-
Rg($MJ\ m^{-2}$)	13,84	29,54	13,94	29,80	4,51	29,79	9,96	29,97	-
P-RO (mm)	zero	9,65	zero	25,40	zero	81,60	zero	43,99	1673
ETo ($mm\ d^{-1}$)	2,59	6,50	3,13	6,49	0,78	6,38	1,69	7,82	1845

Fonte: Autor, 2013.

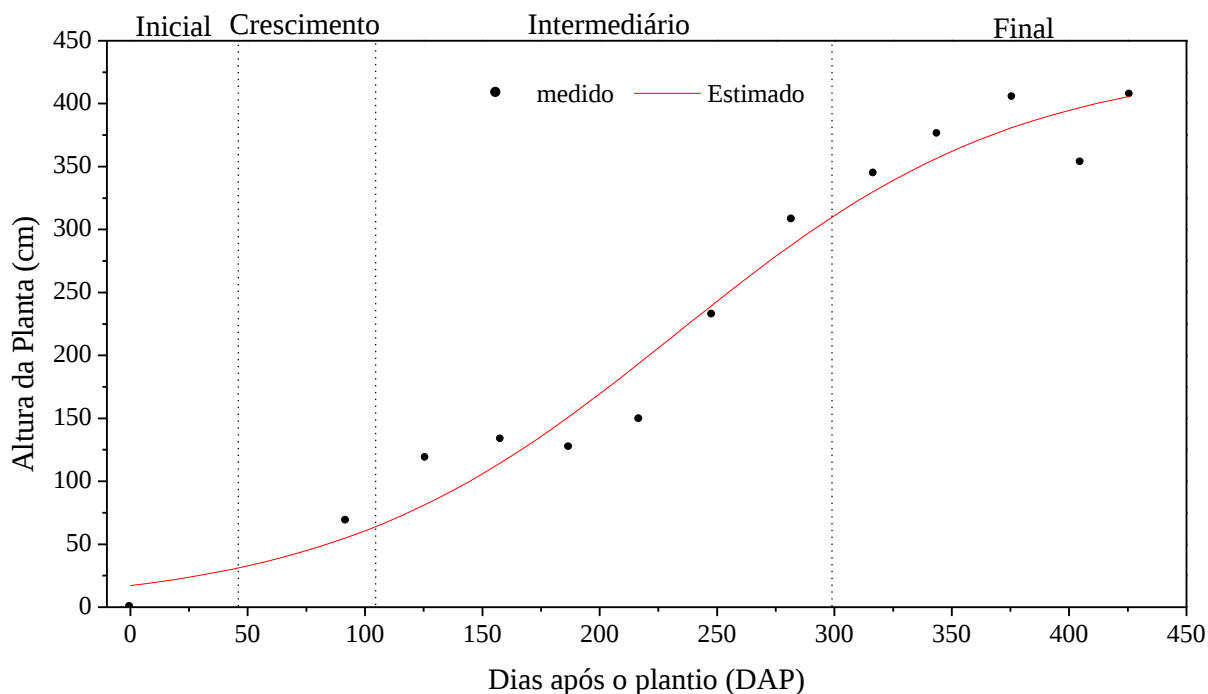
A fase correspondente ao período final foi a que correspondeu aos maiores valores de DPV, VV, Rn e Rg durante todo o ciclo da cana-de-açúcar (todos aos 421 DAP), juntamente com a máxima da T_{ar} e mínima de UR_{ar} , ambos aos 421 DAP, influenciaram no aumento da demanda evapotranspirativa, contribuindo para uma ETo máxima de 7,82 $mm\ d^{-1}$ aos 421 DAP. Os valores máximos de DPV, Rn, Rg e o valor máximo de UR_{ar} ocorreram aos 310 DAP, enquanto o mínimo de T_{ar} foi observado um dia após (311 DAP). A VV mínima foi constatada durante do dia 316, sendo esse valor o menor valor mínimo durante todo o período

de cultivo. Durante a fase IV a chuva efetiva máxima foi de 43,99 mm em um total de 332,53 mm nesse período, correspondendo a 13,22% desse montante. O total de chuva efetiva em todo cultivo de cana-de-açúcar foi de 1672,85 mm, uma média de 3,96 mm d⁻¹. Porém, essa distribuição foi irregular, onde 220 dias do total não apresentaram precipitação, estando distribuídos em todas as fases de desenvolvimento. Esse total pluviométrico está dentro da faixa média para uma série histórica de 29 anos (1972 – 2001) para a região de Maceió, Alagoas (SOUZA et al., 2004). A ETo acumulada foi de 1846,48 mm para um ciclo de 422 dias, uma média de 4,38 mm d⁻¹, encontrando-se na faixa observada por Inman-Bamber (2004), que obteve uma ETo variando de 2 a 6 mm d⁻¹ para um cultivo de cana-de-açúcar.

4.2 Condição cultural (IAF e Altura da planta)

A variação da altura da planta (h_c) em função dos DAP está ilustrada na Figura 4. O coeficiente de determinação (R^2) da curva ajustada pelo modelo sigmóide de Boltzmann foi elevado (0,96) e os coeficientes da equação estão listados na Tabela 6. A cultura apresentou crescimento contínuo até a fase final, quando houve a colheita da cana-de-açúcar, apresentando h_c entre 0,17 m no início das medições, até 4,04 m no seu final, com taxa de crescimento médio de 0,91 cm d⁻¹. A fase intermediária contribuiu com um maior incremento de crescimento diário, com uma taxa de 1,27 cm d⁻¹. Durante o 187 DAP, houve uma tendência da diminuição da taxa de crescimento (Figura 4), fato associado à alta quantidade de precipitação, juntamente com as baixas temperaturas e radiação, reduzindo a taxa de fotossíntese da cultura, observado também aos 407 DAP. De acordo com os valores ajustados pelo modelo de Boltzmann, o valor máximo descrito pelo modelo foi 6,21% maior que o valor máximo observado (407,04 cm) no último dia após a emergência das plantas. Observa-se que houve significância a 1% para todos os parâmetros avaliados, quando comparados estatisticamente pelo teste de Tukey, indicando que esses parâmetros podem ser utilizados para estimativa da altura de plantas.

Figura 4 – Variação da Altura da Planta (h_c) para um cultivo de cana-de-açúcar em Rio Largo, Alagoas, no período de Setembro de 2005 a Novembro de 2006. Os pontos pretos são valores de h_c medido, enquanto a linha vermelha indica a simulação do IAF pela equação sigmoidal de Boltzmann.



Fonte: Autor, 2012.

Tabela 6- Parâmetros da equação sigmóide de Boltzmann para a estimativa da Altura da Planta (h_c).

Parâmetros para a Equação de Boltzmann	Valores
a	434,44** ($\pm 36,25$)
b	232,57** ($\pm 18,32$)
c	72,90** ($\pm 13,52$)
R^2	0,96

Fonte: Autor, 2012

** = $p < 0,01$.

A variação do índice de área foliar (IAF) em função do DAP está ilustrada na Figura 5. A estimativa desse parâmetro por meio da equação de Boltzmann é mostrada na Tabela 7, com coeficiente de determinação igual a 0,88, indicando um bom ajuste. A cultura apresentou, no período inicial, um IAF ajustado de 0,11. No momento da colheita, o IAF ajustado apresentou um valor de 5,26. Esse foi superior ao observado por Oliveira et al. (2007), que estudando a correlação entre a biomassa e a área foliar de três cultivares de cana-de-açúcar, obtiveram um índice de área foliar máximo em torno de 4,0. Teixeira et al. (2012),

observando a interceptação de água pelo dossel da cultura de cana-de-açúcar, constatou um IAF de 3,3 para um ciclo de 310 dias de cultivo. Para RB92579 em condições irrigadas, Silva et al. (2012a) observaram um IAF de 5,55 em um cultivo de 332 dias. Os dados observados estão de acordo com os citados por Inman-Bamber (2004) que avaliando o critério do estresse hídrico em cana-de-açúcar observou que a alta ou baixa demanda hídrica condicionaram em redução no IAF. Observa-se que houve significância a 1% para os parâmetros IAF máximo (a) e valor central do DAP (b) e significância a 5% para faixa do DAP onde os valores de IAF variam (c), indicando que esses parâmetros podem ser utilizados para cálculo da estimativa dos valores de IAF.

Figura 5 – Variação do Índice de Área Foliar (IAF) para um cultivo de cana-de-açúcar em Rio Largo, Alagoas, no período de Setembro de 2005 a Novembro de 2006. Os pontos pretos são valores de IAF medido, enquanto a linha vermelha indica a simulação do IAF pela equação sigmoidal de Boltzmann.

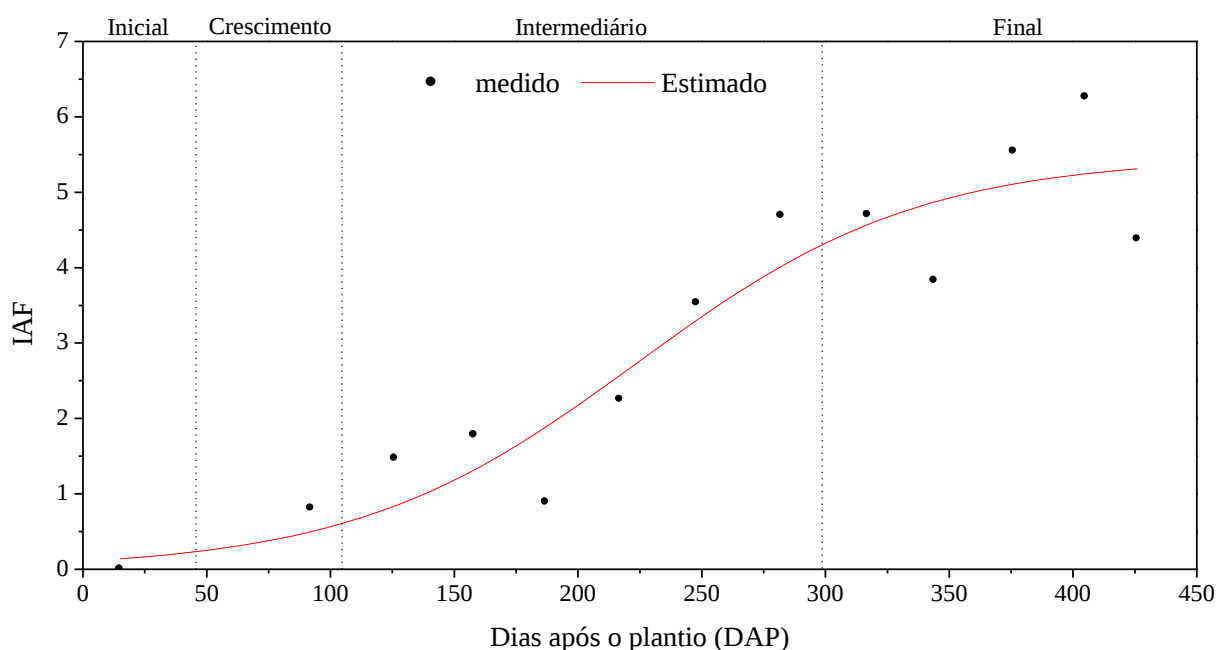


Tabela 7- Parâmetros da equação sigmóide de Boltzmann para a estimativa do Índice de Área Foliar (IAF).

Parâmetros para a Equação de Boltzmann	Valores
a	5,46** ($\pm 0,67$)
b	223,69** ($\pm 25,48$)
c	57,25* ($\pm 20,48$)
R ²	0,88

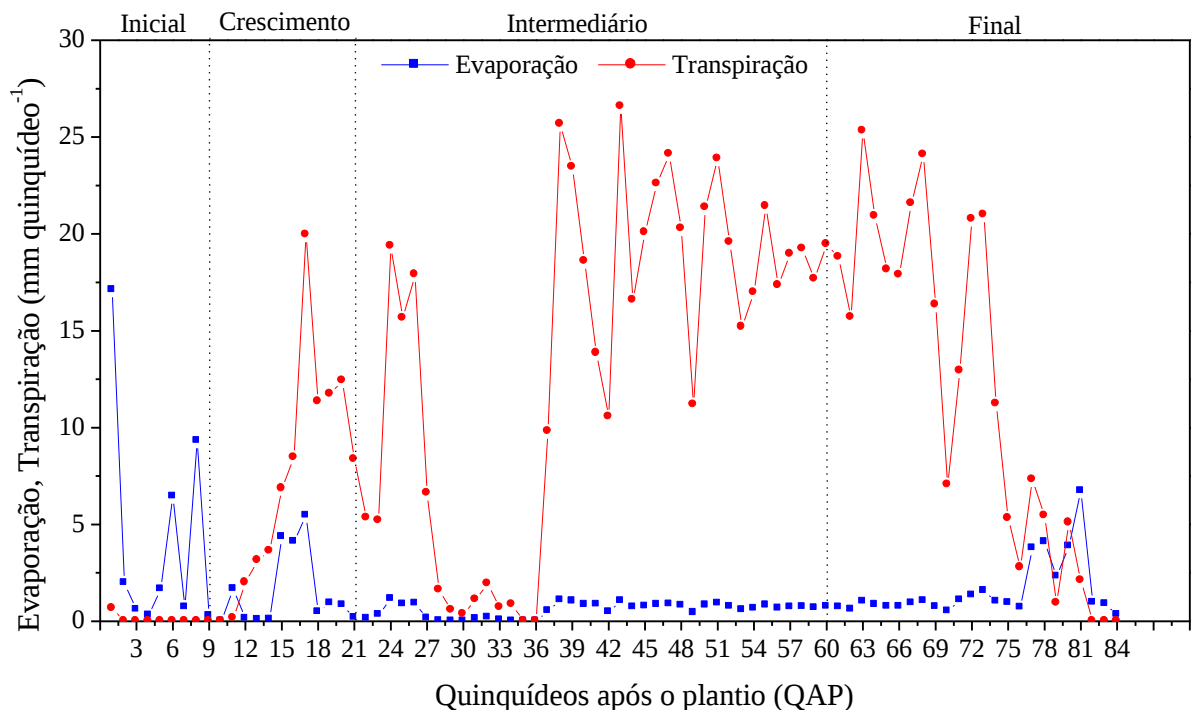
Fonte: Autor, 2012.

Nota: * = $p < 0,05$; ** = $p < 0,01$

4.3 Evaporação, transpiração e coeficiente da cultura

As componentes evaporação e transpiração durante todo o ciclo de cultivo da cana-de-açúcar, na região de Rio Largo, Alagoas são apresentadas na Figura 6.

Figura 6 – Evaporação e Transpiração quinquidial nas diferentes épocas de crescimento.



Fonte: Autor, 2012.

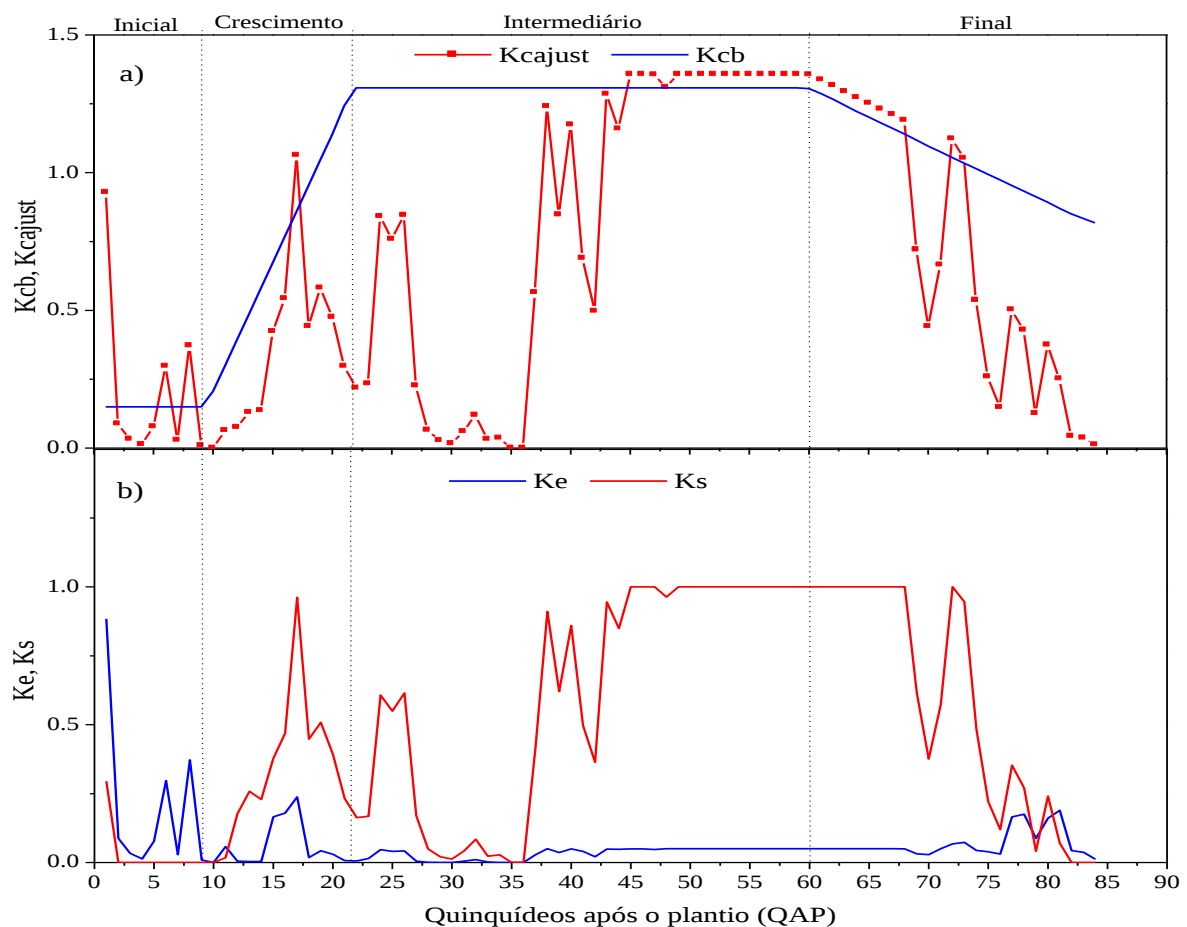
Observa-se um pico inicial da evaporação no quinquedeo 1 (total de 17,11), devido à presença do solo nu por ocasião do plantio da cultura, observando-se 38,43 mm durante todo período inicial. A pequena quantidade de transpiração observada durante esse mesmo período (0,67 mm) é decorrente da ausência de plantas no ambiente cultivado. O período de crescimento corresponde a um incremento de transpiração pelas plantas e ao decréscimo da evaporação do solo, decorrente do fechamento do dossel foliar. A maior taxa de transpiração ocorrida durante esse período ocorre no 17º quinquedeo (19,94 mm), correspondendo a 22,65% do total ocorrido (88 mm). A transpiração decresceu acentuadamente durante os quinquedeos 28 ao 36 na fase intermediária, com um total de 7,18 mm durante esses quinquedeos. A transpiração durante esse período correspondeu a mais de 50% do total durante o ciclo de cultivo, com 531 mm de 900 mm, enquanto a evaporação manteve-se baixa durante essa época, correspondendo a 22,34 mm.

Durante o período final da cultura, observa-se novamente uma queda da componente transpiração (total de 280 mm) e um acréscimo evaporativo, explicado pelo aumento do

número de folhas secas em decorrência da senescência da cultura. A utilização do FAO-56 com coeficiente da cultura “dual” é visada para otimização da produção da cultura através da redução da fração de evaporação na evapotranspiração (ALLEN, 2000). A taxa evaporativa (116 mm) em todo o cultivo correspondeu a 11,40% da evapotranspiração real. Apesar de o requerimento hídrico ser diferente, Silva et al. (2012) observaram porcentagens semelhantes de transpiração e evaporação, para uma variedade de cana-de-açúcar RB 92579, através do cálculo FAO-56 coeficiente da cultura “dual” em um ambiente irrigado.

Os valores de Kc basal (Kcb) corrigidos para as condições locais de umidade relativa e velocidade média do vento a 2 m de altura, coeficiente da cultura ajustado (Kc ajust), coeficiente de evaporação (Ke) e fator de depleção da transpiração (Ks) no cultivo de cana-de-açúcar na região de Rio Largo, Alagoas são mostrados na Figura 7.

Figura 7- Coeficiente da cultura basal (Kcb), coeficiente da cultura ajustado (Kc ajust), coeficiente de evaporação (Ke), fator de depleção da transpiração (Ks), para um cultivo de cana-de-açúcar em Rio Largo, Alagoas.



Fonte: Autor, 2012.

Os valores do K_{cb} foram 0,15, 1,31 e 0,82, correspondentes aos valores inicial, intermediário e final, respectivamente (Figura 7a). O valor do K_{cb} inicial não sofre correção, porém os valores de K_{cb} do período intermediário e final foram 9,1% e 15,7% superiores aos valores tabelados. Os $K_{cb_{int}}$ e $K_{cb_{fim}}$ foram maiores aos encontrados por Lyra et al. (2007b), que observando a evapotranspiração da cultura através do coeficiente da cultura “dual”, obtiveram valores de 1,23 e 0,72 para $K_{cb_{int}}$ e $K_{cb_{fim}}$, respectivamente. Valores diferenciados de K_{cb} também foram encontrados por Silva et al. (2012) para um cultivo de cana-de-açúcar variedade RB 92579, obtendo-se 1,34 e 0,98 para $K_{cb_{int}}$ e $K_{cb_{fim}}$, respectivamente. Esse alto valor observado por Silva et al. (2012) pode ser explicado devido ao mesmo ter adotado um manejo de irrigação durante o cultivo.

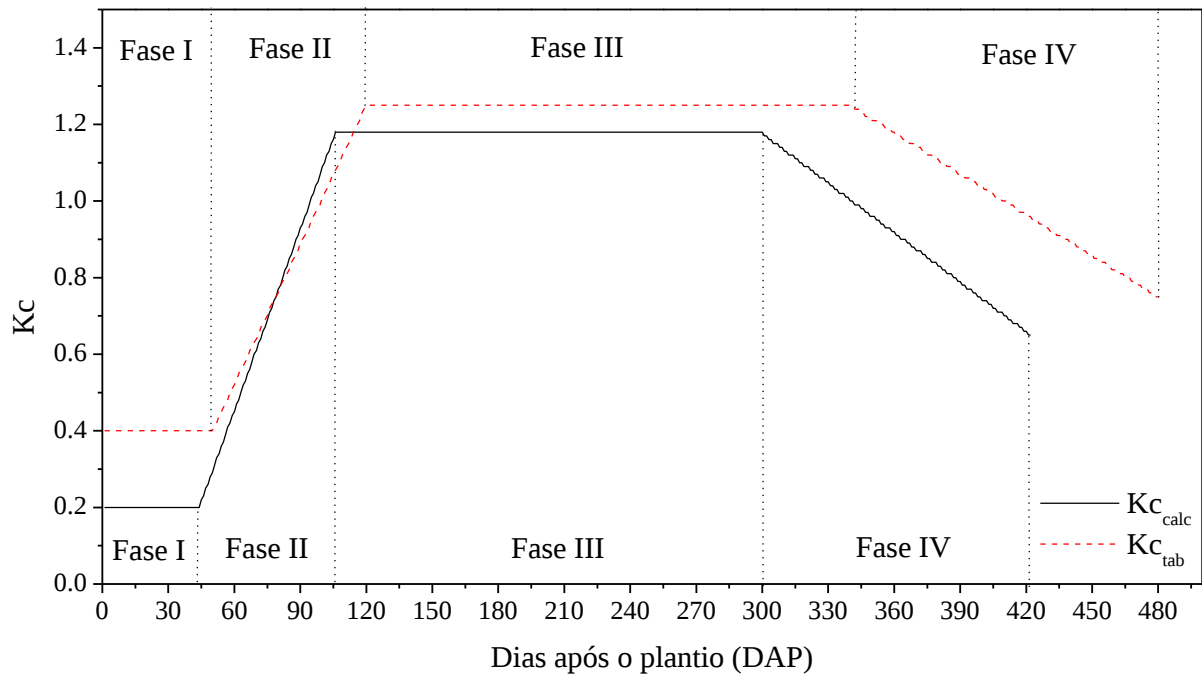
Os valores do K_c ajust são definidos em função do coeficiente da cultura (K_{cb}) e o fator de depleção da transpiração (K_s), juntamente com o fator de evaporação (K_e), regendo a quantidade real do coeficiente da cultura “dual” para a quantificação da evapotranspiração real. Durante o ciclo da cultura o K_c ajust manteve-se em sua maior parte (63%), abaixo do K_{cb} (Figura 7a), estando acima somente nos períodos em que houve precipitação pluvial, nos quinquídeos 6 e 8 para o período inicial e quinquídeo 19 no período de crescimento da cultura. Durante o período intermediário e início do final (quinquídeos 45 ao 68), houve uma maior quantificação do K_c ajust, onde este foi superior ao K_{cb} (cerca de 28% do período de cultivo). Essa época apresentou a maior quantidade de chuva efetiva (1141 de 1672 mm), mantendo a superfície do solo úmida. Observa-se ainda que o K_c ajust torna-se igual ao coeficiente de redução de água no solo (K_e) durante o período inicial de desenvolvimento, indicando que maior parte da perda de água encontra-se ainda via evaporação de água da superfície do solo. O K_c ajust variou de zero a 1,36 durante todo o cultivo. De acordo com Allen et al. (2000), o K_c ajust distancia-se de zero durante os períodos em que a superfície do solo foi molhada pela chuva, aproximando-se de zero em períodos secos. Lyra et al. (2007b) estudando o coeficiente basal da cultura, observaram semelhante variação do K_c ajust (zero a 1,35), para um cultivo de cana-de-açúcar em sequeiro, na região dos Tabuleiros Costeiros de Alagoas.

O coeficiente de evaporação do solo (K_e) (Figura 7b) em sua maior parte encontra-se na fase inicial e final do cultivo. O período inicial correspondeu àquele que possuiu maiores taxas de evaporação do solo, devido ao mesmo não estar coberto totalmente pelo dossel da cultura. Altos valores de K_e são atribuídos ao pequeno IAF e ao baixo crescimento das plantas (SILVA et al., 2012), ou pela senescência das plantas no final do cultivo, como

observado durante esse período de desenvolvimento da cultura, decrescendo juntamente com o incremento da cobertura vegetal. Observou-se que o coeficiente depleção, manteve-se oscilante durante todo o período de cultivo, chegando ao seu valor máximo ($K_s = 1$), quando houve alta precipitação pluvial. Os valores de K_s estão totalmente dependentes do total de água no solo e da depleção ao longo da taxa de molhamento do solo. Em cultivos irrigados Liu e Luo (2010) e Silva et al (2012) concluíram que os valores de K_s sempre tendem ficar próximos de 1, enquanto valores em cultivo de sequeiro tendem a variar de acordo com a disponibilidade hídrica da região (LYRA et al., 2007b).

Os resultados dos coeficientes da cultura calculados e tabelados pelo boletim FAO 56 encontram-se na Figura 8. O cálculo do coeficiente da cultura único (K_c), deu-se a partir da relação dos intervalos de tempo entre os eventos de chuva, sua magnitude, evapotranspiração de referência (ETo), velocidade do vento, umidade relativa do ar e altura da planta ao longo do ciclo, interpolando-se os valores para cálculo diário.

Figura 8 – Coeficiente da cultura calculado da cana-de-açúcar em regime de sequeiro, sob condições climáticas na região de Rio Largo, Alagoas e coeficiente da cultura tabelado do Boletim FAO 56 (ALLEN et al., 1998).



Fonte: Autor, 2012.

Verificou-se na fase I que o valor do K_c inicial (0,2) foi inferior ao proposto no boletim FAO 56 ($K_c \sim 0,4$). Para a fase II, houve incremento do K_c de 0,22 a 1,18, sendo este último inferior ao boletim FAO 56 ($K_c \sim 1,25$). O K_c manteve-se estável durante a fase III de

desenvolvimento da cultura. Durante a fase IV, houve um decréscimo do coeficiente da cultura até 0,65. Este se manteve abaixo ao citado no boletim FAO 56 ($K_c \sim 0,75$).

Os motivo dos valores do K_c calculado ser inferior ao tabelado se deve ao fato desses coeficientes serem tabelados para um manejo adequado à cultura, livre de pragas, doenças, adubado e com suprimento hídrico máximo (ALLEN et al., 1998). Os valores dos coeficientes da cultura calculados para o período inicial (0,20), intermediário (1,18) e final (0,68) foram 50, 5,6 e 9,4% inferiores aos coeficientes tabelados, respectivamente. O baixo valor do coeficiente inicial (0,20) deve-se ao fato da pouca precipitação pluvial (magnitude) e dos poucos números de dias com chuva (frequência), proporcionando uma baixa precipitação média durante esse período (6,73 mm) e aumentando o intervalo de tempo entre os eventos de molhamento (onze dias). Lyra et al. (2012) observando o K_c inicial ajustado às condições climáticas em diferentes épocas de plantio na região de Campos dos Goytacazes, RJ, constatou uma variação do K_c inicial de acordo a época de maturação, variando de 0,28 em cana precoce e 0,29 em cana de maturação média, valores aproximados ao desse estudo.

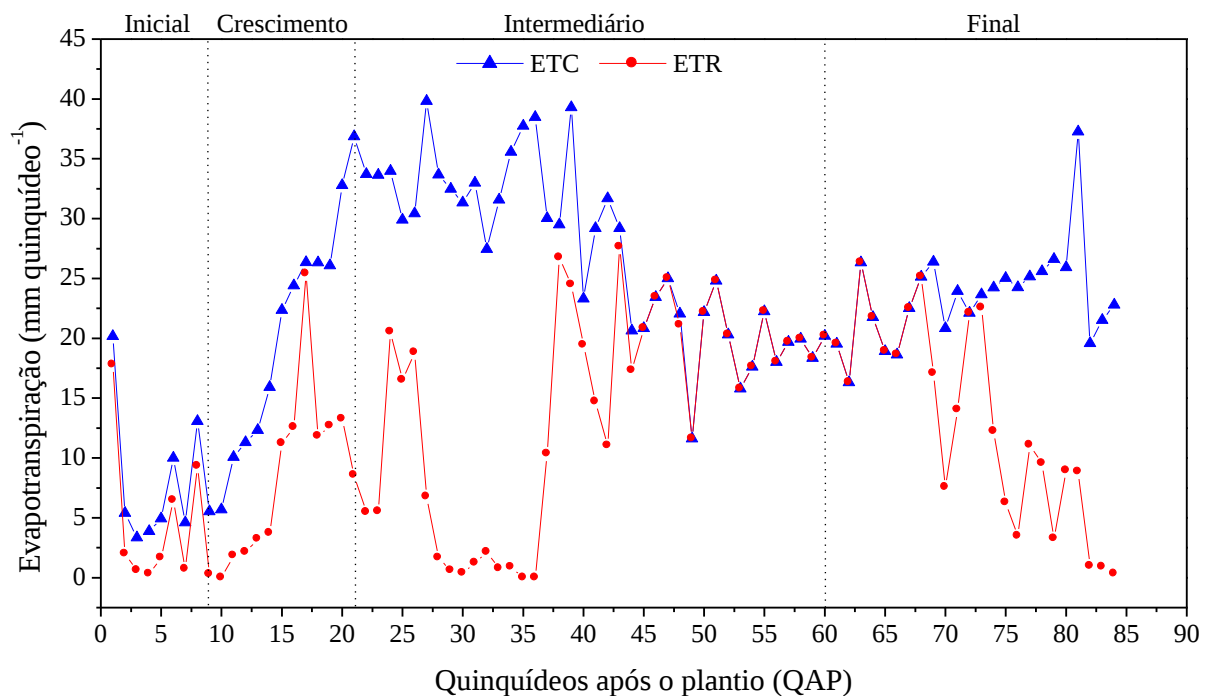
Lyra et al. (2007a) ao estudarem o coeficiente da cultura único em dois ciclos de cultivo, em regime de sequeiro, observaram que ambos mantiveram-se superiores aos encontrados em estudo. Para o K_c inicial esse valor foi 4,5 e 3,75 vezes maior que o K_c inicial encontrado nesse trabalho (0,20) para o ciclo 1 e 2, respectivamente. Essa diferença pode ser explicada devido à maior magnitude de chuva (10,6 mm) em uma menor quantidade de evento (a cada dois dias), incrementando o valor do K_c inicial. Silva et al. (2012a) observando o requerimento hídrico e o coeficiente da cultura da cana-de-açúcar, em ambiente irrigado, encontraram que o K_c inicial e final foram superiores (0,65 e 0,85, respectivamente) aos encontrados neste estudo e que o K_c intermediário foi inferior ao relatado em estudo (1,18). O menor coeficiente intermediário encontrado pode ser explicado devido às condições ambientais e da cultura durante essa época. Chavan; Khodke; Changade (2009) estudando o balanço de água no solo e seu requerimento em cinco regiões do semiárido da Índia observaram coeficientes da cultura maiores (0,6; 1,25 e 0,85 para K_c inicial, intermediário e final, respectivamente) aos encontrados no estudo.

4.4 Evapotranspiração Real

4.4.1 ETR 1 - Método Penman-Monteith FAO Kc dual

A variação dos valores da evapotranspiração da cultura (ETc) e evapotranspiração real (ETR 1) são apresentados na Figura 9. O método da ETR 1, definido como padrão, apresentou variação em seus valores durante o período de cultivo. O total de evapotranspiração real no ciclo foi de 1017 mm. Silva et al. (2012), em plantio irrigado de cana-de-açúcar observaram um maior acúmulo de ETR (1657 mm), demonstrando que a maior disponibilidade de água acarreta em uma maior ETR em todo o ciclo da cultura. Brito; Libardi; Ghiberto (2009) observando os componentes do balanço de água em solos cultivados com cana-de-açúcar, em regime de sequeiro na região de Jaboticabal e Pirassununga em São Paulo, constataram que os valores da ETR para essas duas localidades se assemelharam ao encontrado nesse estudo, ou seja, observa-se que a tendência fisiológica da cultura é de reter água quando a mesma apresenta estresse hídrico, reduzindo os valores ETR.

Figura 9 – Evapotranspiração real pelo método Penman-Monteith FAO “Kc dual” (ETR 1) e evapotranspiração da cultura (ETC), para um cultivo de cana-de-açúcar em Rio Largo, AL.



Fonte: Autor, 2012.

A ETR 1 apresentou um pico no primeiro quinquídeo de 45,41%. Os valores mínimos foram observados durante o nono quinquídeo desse período, com um acumulado de 0,28 mm quinquídeo⁻¹. Durante o período de crescimento, observa-se um máximo de 25,19 mm no quinquídeo 17, 3,9% abaixo do valor da ETc para a mesma época. Tem-se ainda que, os valores mínimos observados durante esse período podem ser decorrentes da falta de precipitação pluvial, encontrados no décimo quinquídeo, onde não ocorreu ETR. O período final apresenta uma queda nos valores de ETR 1, principalmente após o período chuvoso e início da época de maturação da cultura, apresentando um total de 357,12 mm, com máxima de 26,33 mm de ETR 1 acumulada (quinquídeo 63) e mínima de 0,34 mm, no dia da colheita.

O período intermediário foi marcado por dois contrastes na ETR 1, uma durante o período de estiagem e outra no período chuvoso. No primeiro, encontram-se baixos valores de ETR, observando mínimos de 0,05 mm no 36º quinquídeo. O aumento da ETR é observado juntamente com o início do período das chuvas, a partir do 37º quinquídeo, gerando um acumulado de 465,30mm até o final do período intermediário, correspondendo a aproximadamente 85% do total de evapotranspiração real nessa época. Observa-se ainda que a partir do quinquídeo 45 os valores de ETR igualam-se aos da evapotranspiração da cultura, já que o fator de depleção da transpiração torna-se máxima, fazendo com que o Kc ajust seja semelhante ao Kc para o cálculo da ETC, portanto, $ETR = ETC$. O máximo de ETR 1 apresenta-se durante o 43º quinquídeo (212 DAP).

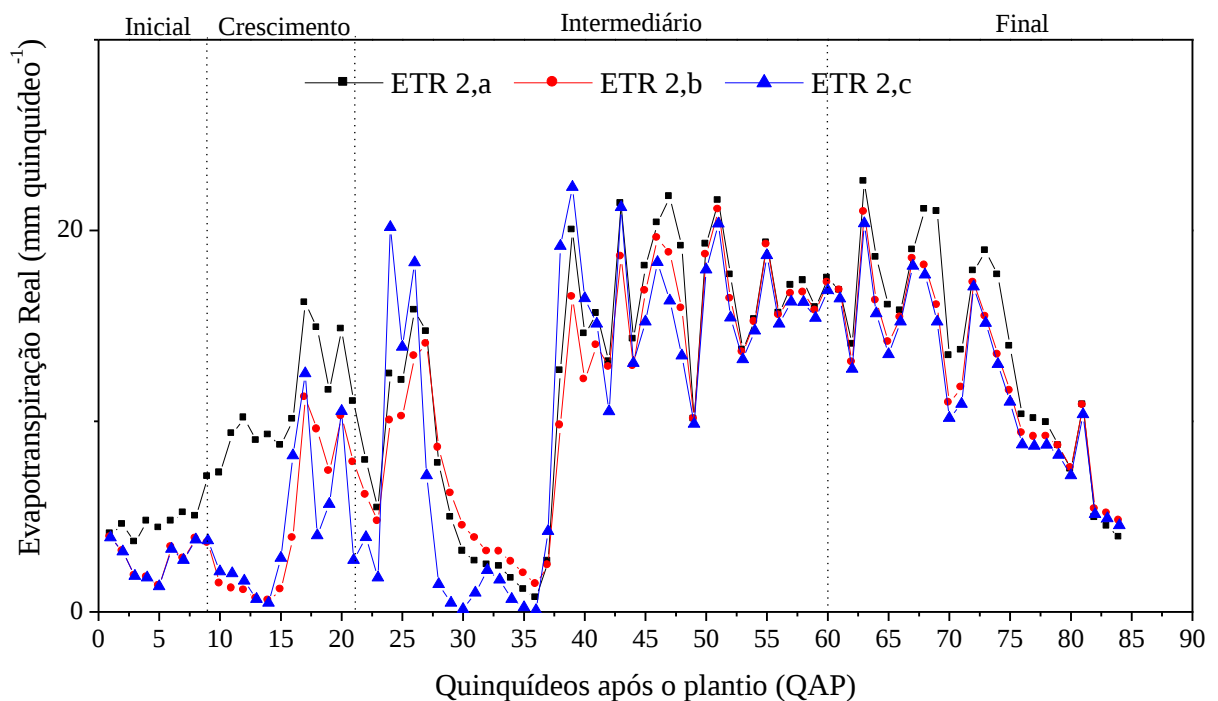
A evapotranspiração da cultura (ETc) apresentou variação durante o período de cultivo, totalizando 1948 mm, com média de 4,6 mm d⁻¹. Valor semelhante foi observado por Silva et al. (2012b) no semiárido baiano, para um requerimento hídrico de 1710 mm, em uma cana soca irrigada. Ferreira Junior et al. (2012) estudando nove variedades de cana-de-açúcar na socaria em Rio Largo, Alagoas, constatou uma ETc média de 4,3 mm⁻¹. Almeida et al. (2008) observando o desenvolvimento vegetativo e produção de dois ciclos de cana irrigada, constataram uma ETc total de 1448 mm para cana planta e 1584 mm para soqueira da cana. Tem-se que a variação do local, tempo de cultivo da cultura e o requerimento hídrico influenciam nos valores médios e acumulados da ETc. O período inicial correspondeu à cerca de 3,64% (70,92 mm) do total da ETc durante todo ciclo. A fase de crescimento foi marcada por um intenso acréscimo de evapotranspiração, variando de 5,67 mm durante o primeiro quinquídeo desse período, até 36,85 mm durante o 21º quinquídeo, correspondendo a um total de 250,42 mm, uma taxa de 22,4% abaixo da ETo na mesma época (Figura 3). O período intermediário foi o que teve maior incremento de ETc, correspondendo a mais da metade

(54,27%) do total evapotranspirado pela cultura da cana-de-açúcar. A taxa máxima de ET_c foi observada quando não houve precipitação, no 27º quinquêdeo (39,81 mm). Constatou-se que o mínimo de ET_c foi de 11,61 mm, no 49º quinquêdeo durante a época com maiores concentrações de chuva.

4.4.2 ETR 2 - Método da água disponível (NULLET; GIAMBELLUCA, 1988)

O método da água disponível, proposto por Nullet e Giambelluca (1988), obtido em seu método original (ETR 2,a) e modificações através do coeficiente da cultura (ETR 2,b) e do índice de área foliar (ETR 2,c) encontram-se na Figura 10. O total da evapotranspiração real foi de 874; 819 e 754 mm para ETR 2,a, ETR 2,b e ETR 2,c. Esses valores foram próximos aos descritos por Ghiberto et al. (2011) que, ao estudar os componentes do balanço de água através da equação geral do balanço de água no solo, constatou uma ETR entre 847 a 970 mm.

Figura 10 – Evapotranspiração real pelo método da água disponível (ETR 2) , para um cultivo de cana-de-açúcar em Rio Largo, AL, em que: ETR 2,a – método original; ETR 2,b – método modificado pelo Kc e ETR 2,c – método modificado pelo IAF.



Fonte: Autor, 2012.

Os modelos modificados propõem que há uma variação do armazenamento de água no solo de acordo com a tendência de crescimento do sistema radicular, variando os valores de ETR. Tem-se que ao longo do ciclo inicial da cultura, ETR 2,a manteve-se acima das

metodologias modificadas, já que essa metodologia leva em consideração a contabilidade da quantidade de água em todo perfil estudado (0,60 m). Durante esse período, ocorre a estabilização da cultura e o seu sistema radicular está disponível apenas nos primeiros 30 centímetros no perfil do solo, podendo gerar dados errôneos na contabilidade da ETR quanto ao uso da ETR 2,a. Durante o período inicial, para ETR 2,a, obteve-se uma evapotranspiração máxima no quinquídeo 9 (6,07 mm) e o valor mínimo encontrado durante o primeiro quinquídeo (4,05 mm), com média de 0,96 mm d⁻¹ durante esse período.

Observa-se que os valores de ETR 2,b e ETR 2,c assemelham-se durante o período inicial, já que, de acordo com esses modelos, o sistema radicular para ambos encontra-se a dez centímetros de profundidade. Durante esse mesmo período, a ETR está dependente em sua maior parte da evaporação do solo. Durante os quatro primeiros quinquídeos os valores obtidos para essas duas variáveis estudadas foram idênticos, com máximos para ambos de 3,90 mm durante o primeiro quinquídeo. Os valores mínimos foram encontrados no quinto quinquídeo (1,35 e 1,33 mm para ETR 2,b e ETR 2,c, respectivamente). Durante o período de crescimento, a ETR 2,a apresentou um aumento gradativo em seus valores, com um pico durante o 17º quinquídeo, apresentando um máximo de 14,10 mm. Esses valores não foram observados para ETR 2,b e ETR 2,c nos primeiros quinquídeos nessa fase, já que a precipitação foi baixa durante esse período e houve necessidade da planta reter água no seu sistema, diferente de ETR 2,a que possui o perfil completo com água disponível para utilizar na ETR. As taxas variaram de 0,58 mm (quinquídeo 14) a 11,22 mm (quinquídeo 17) para ETR 2,b. Esse valor máximo provavelmente ocorreu devido a uma precipitação de 35 mm nos dois dias anteriores. Para ETR 2,c encontrou-se um máximo de 12,50 mm, durante o quinquídeo 17 e um mínimo de 0,46 mm no 14º quinquídeo.

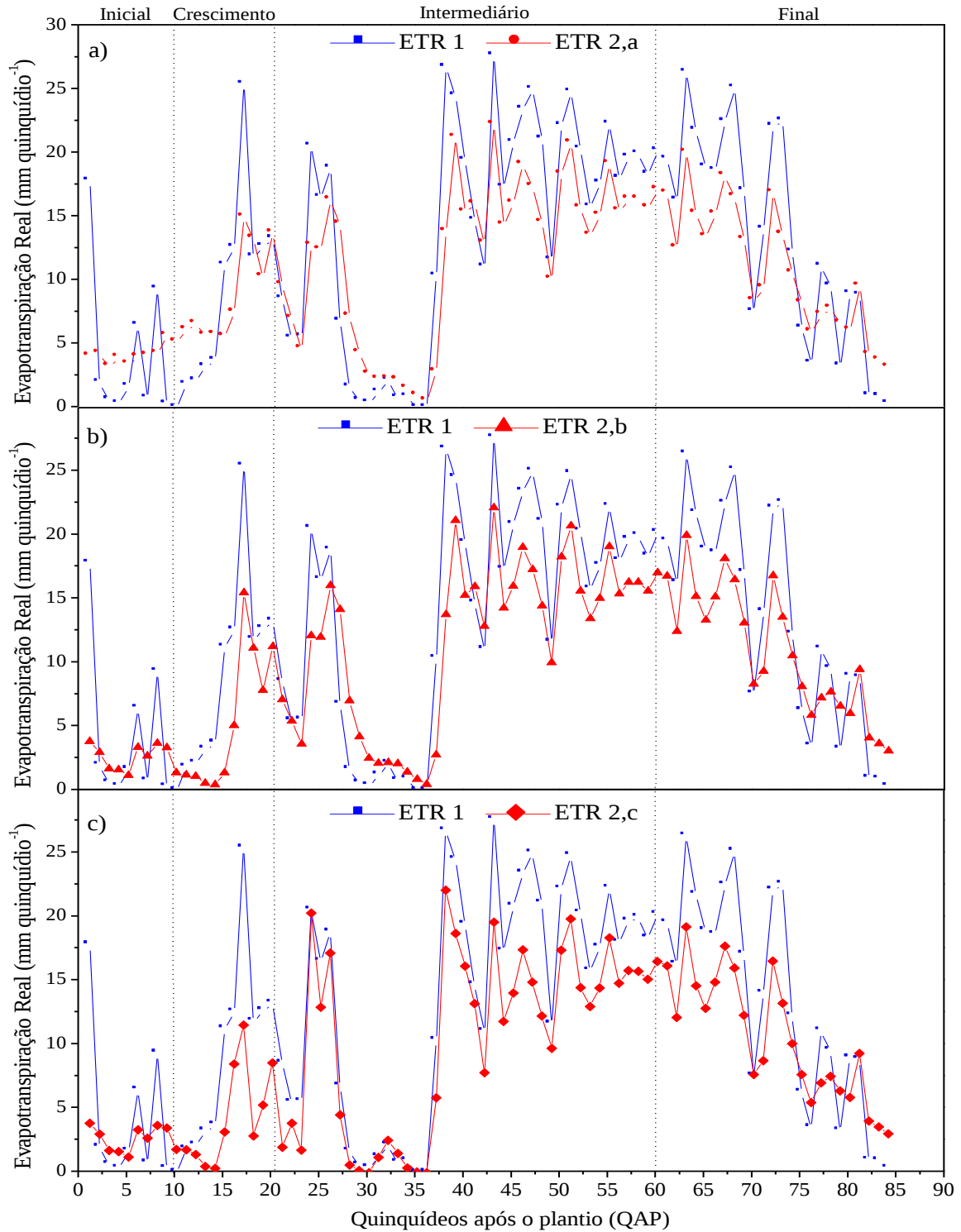
O período intermediário contribuiu com um decréscimo acentuado nas taxas de ETR juntamente com o período de menor precipitação pluvial. Durante essa época, os valores de ETR 2,a variaram de 1,51 a 21,07 mm (quinquídeos 36 e 51, respectivamente), onde a precipitação não ultrapassou os 7 mm. Após o 38º quinquídeo, houve um acréscimo das taxas de ETR e oscilação da mesma durante o resto desse período, de acordo com a variação da precipitação pluvial. O valor máximo para ETR 2,b (quinquídeo 51) e ETR 2,c (quinquídeo 43) para o mesmo período, foram de 21,07 e 21,21 mm, respectivamente. O período final contabilizou aquele em que houve um decréscimo da ETR em todos os métodos estudados, já que nesse mesmo período houve diminuição acentuada da precipitação pluvial juntamente com o período de senescência das plantas. Os valores máximos para ETR 2,a, ETR 2,b e

ETR2,c foram de 20,95; 20,95 e 20,36, respectivamente, todos ocorridos no quinquídeo 63. Os valores mínimos encontrados no último quinquídeo foram de 4,77; 4,77 e 4,53 para ETR 2,a; ETR 2,b e ETR 2,c, respectivamente.

A Figura 11 compara a variação entre a evapotranspiração real pelo método Penman-Monteith FAO “Kc dual” (ETR 1) e os métodos da água disponível original (ETR 2,a) e suas modificações (ETR 2,b e ETR 2,c). Observa-se que não há tendência uniforme para ETR 1 comparado aos demais, durante o período inicial. Tem-se que o acumulado de ETR 1 durante esse período foi inferior em 11,13% para ETR 2,a e superior em aproximadamente 34% para ETR 2,b e ETR 2,c. Durante o segundo quinquídeo até o quinto quinquídeo para ETR 2,b (Figura 11b) e ETR 2,c (Figura 11c) observa-se que, apesar da não haver semelhança nos valores, ocorre um decréscimo nas taxas de evapotranspiração real, comparado ao ETR 1.

Na Figura 11a, durante o período de crescimento, inicia-se um incremento de evapotranspiração real para ambos os casos (ETR 1 e ETR 2,a), seguindo a tendência de continuidade durante todo período. Esse fato ocorre para ETR 2,b e ETR 2,c, iniciando-se no quinquídeo 14, quando as taxas das ETR estudadas tentem a ficar simétricas com ETR 1. Os valores de ETR 2,a e ETR 2,b (Figuras 11a e b), durante o período de estiagem (quinquídeos 27 ao 36) encontram-se abaixo aos observados por ETR 1, diferente aos valores constatados por ETR 2,c (Figura 11c), que se assemelharam aos da ETR 1. Esse fato pode ser explicado devido o perfil radicular encontrar-se ainda em crescimento (aproximadamente 0,30 m de profundidade), estimando apenas a evapotranspiração real naquele perfil, o que não acontece com ETR 2,a e ETR 2,b, onde através desse método, o perfil radicular alcançou seu máximo em profundidade (0,60 m). Durante o período com altos índices de precipitação pluviométrica (quinquídeos 37 ao 71), houve a tendência da ETR 1 ser maior em aproximadamente 4,39; 20,65 e 32,93% para ETR 2,a; ETR 2,b e ETR 2,c, respectivamente durante o quinquídeo 48, período com maior precipitação acumulada (144,54 mm). Em suma, os valores de ETR 1 esteve acima dos de ETR 2 em 63; 71,42 e 78,57% dos casos para ETR 2,a; ETR 2,b e ETR 2,c, respectivamente. O período final foi marcado por baixas taxas de evapotranspiração real para todos os métodos utilizados, com ETR 1 chegando a um mínimo de 0,34 mm no quinquídeo 84.

Figura 11 – Evapotranspiração real pelo método de Penman-Monteith FAO “Kc dual” (ETR 1) e evapotranspiração pelo método da água disponível original (ETR 2,a) e suas modificações (ETR 2,b e ETR 2,c) , para um cultivo de cana-de-açúcar em Rio Largo, AL.

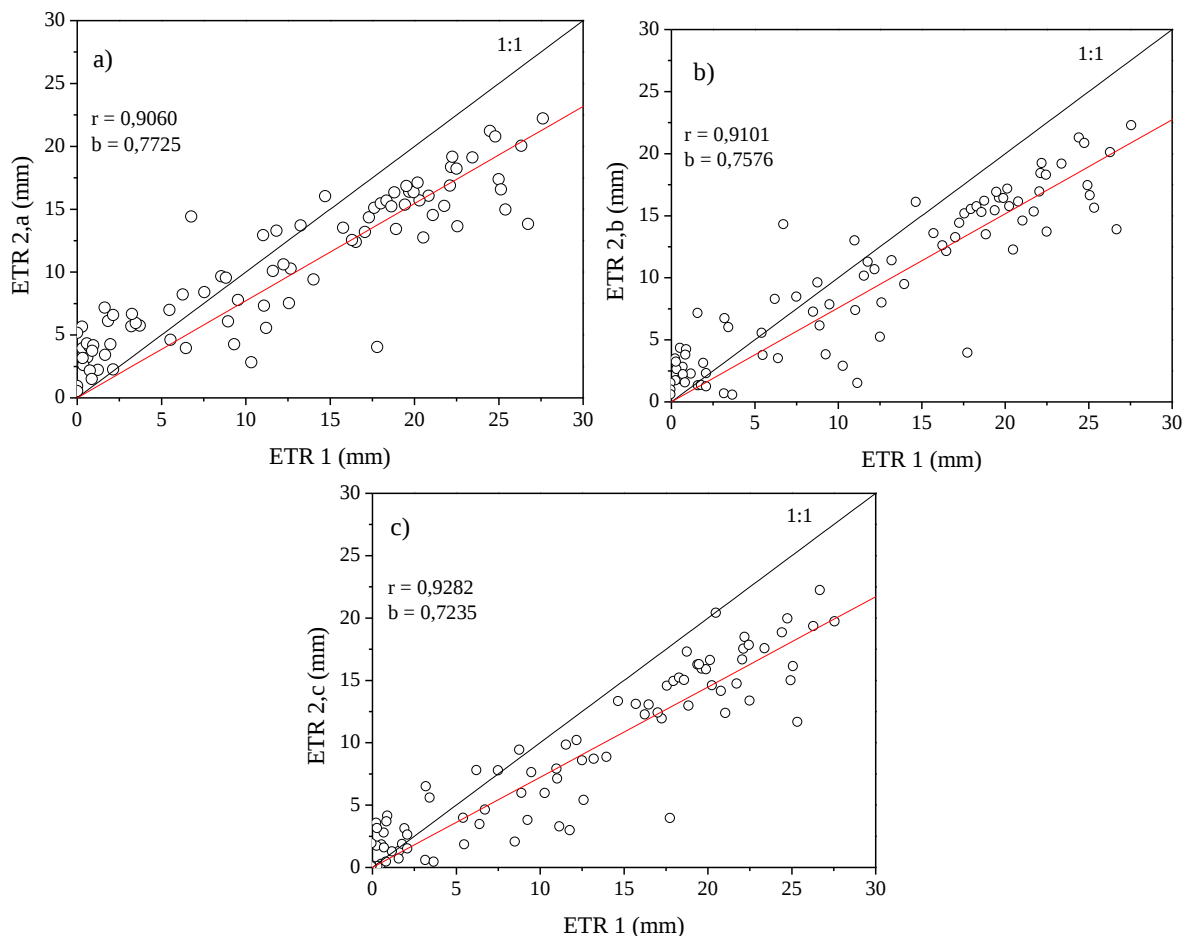


Fonte: Autor, 2012.

A Figura 12 mostra graficamente a análise de regressão para a evapotranspiração real calculada pelo método Penman-Montetih FAO “Kc dual” (ETR 1), comparado com os

métodos de água disponível original (ETR 2,a) e suas modificações (ETR 2,b e ETR 2,c). Observa-se que todos os métodos comparados subestimaram ao ETR 1, onde ETR 2,c apresentou um maior coeficiente de correlação ($r = 0,92$), enquanto ETR 2,a apresentou um coeficiente de 0,90. Os coeficientes angulares (b) ajustados para a equação $Y = b.X$ foram menores que zero e os desvios percentuais negativos, comprovando a subestimativa dos resultados. A Tabela 8 apresenta os resultados estatísticos para os métodos estudados, comparados com ETR 1. Esses resultados mostram que os métodos ETR 2,a e ETR 2,c apresentaram semelhante índice de concordância (d igual a 0,90) e ETR 2,b apresentou um d de 0,91. Observa-se ainda que o desvio percentual e a raiz quadrada do erro médio para ETR 2,a apresentaram-se menor, comparado com os demais ($DP = 14,00$ e $RMSE = 4,56$ mm), apresentando uma melhor performance.

Figura 12 –Correlação da Evapotranspiração real pelo método Penman-Monteith FAO “Kc dual” (ETR 1) e o método da água disponível original (ETR 2,a) e suas modificações (ETR 2,b e ETR 2,c).



Fonte: Autor, 2012.

Tabela 8 – Índice de concordância (d), desvio de porcentagem (DP) e raiz quadrada do erro médio (RMSE) para os métodos da água disponível (ETR 2) comparado com o método Penman-Monteith FAO “Kc dual” (ETR 1) em um cultivo de cana-de-açúcar, na região de Rio Largo-AL.

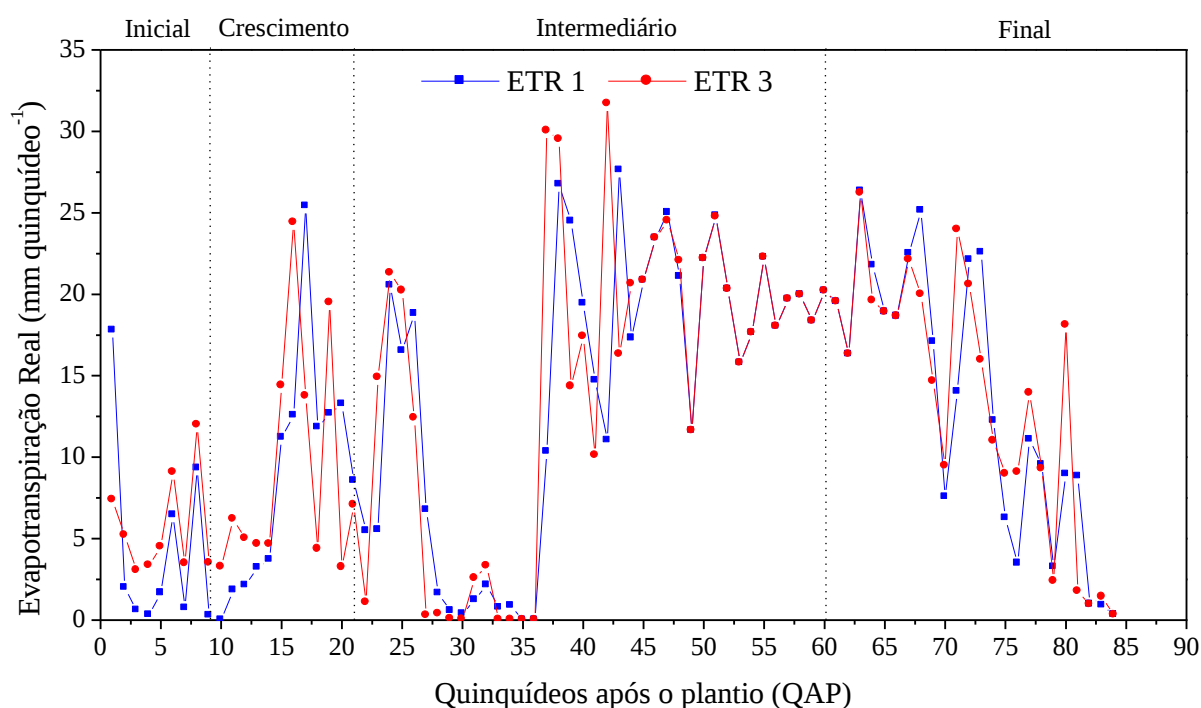
Método	Média (mm quinquédeo ⁻¹)	d	DP (%)	RMSE (mm)
ETR 2,a	10,41	0,90	-14,00	4,56
ETR 2,b	9,76	0,91	-19,41	4,58
ETR 2,c	8,98	0,90	-25,83	4,79

Fonte: Autor, 2012.

4.4.3 ETR 3 – Método do Balanço Hídrico de cultivo (THORNTHWAITE; MATHER, 1955)

O comparativo entre a evapotranspiração real pelo método Penman-Monteith FAO “Kc dual” (ETR 1) e evapotranspiração real pelo método do balanço hídrico de cultivo (ETR 3) são apresentados na Figura 13.

Figura 13 - Evapotranspiração real pelo método Penman-Monteith FAO “Kc dual” (ETR 1) e balanço hídrico de cultivo (ETR 3), para um cultivo de cana-de-açúcar em Rio Largo, AL.



Fonte: Autor, 2012.

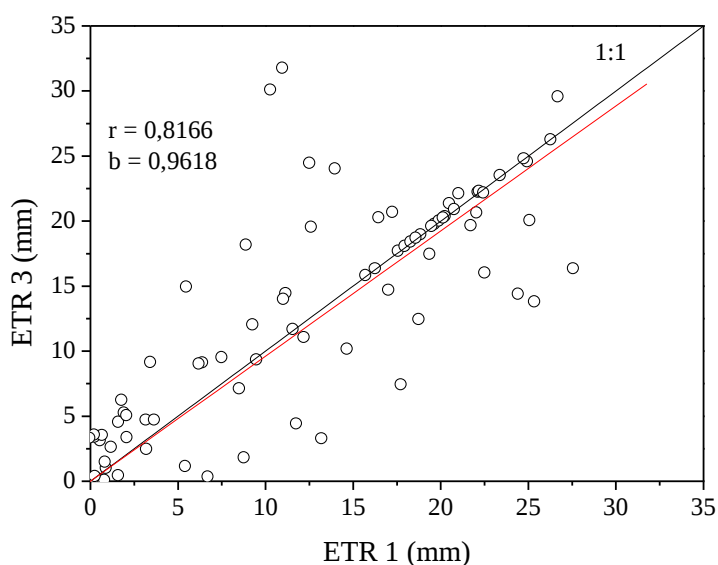
O total de ETR 3 pela cultura foi de 1052 mm. Esse resultado foi condizente aos obtidos por Brito; Libardi; Ghiberto (2009), que ao observar os componentes do balanço de água no solo, no estado de São Paulo, constaram uma ETR em torno de 1058 mm para um cultivo de cana-de-açúcar em sequeiro. Observa-se que apesar das condições ambientais entre ambos os locais relatados (São Paulo e Alagoas) serem diferenciados, a cultura da cana-de-açúcar manteve o mesmo comportamento quanto ao consumo de água e a perda da mesma para atmosfera. Corroborando ao resultado encontrado, Almeida et al. (2008) observaram um maior acúmulo de ETR (1258 mm) para um cultivo de cana-soca, podendo ser explicado pelo fornecimento de água via irrigação. Quanto ao comportamento entre os dois modelos estudados (ETR 1 e ETR 3), observa-se um total de ETR3 durante o período inicial (53,75 mm) correspondente a 4,74% do total em todo cultivo. O terceiro quinquídeo foi aquele que correspondeu ao menor acumulado de ETR3, com 3,16 mm. Esse acumulado foi aproximadamente 81% acima da evapotranspiração pelo método Penman-Monteith FAO “Kc dual” (ETR 1 = 0,60 mm) para o mesmo período. A época de crescimento correspondeu a 12% do total evapotranspirado da cultura, em que o máximo foi observado durante o quinquídeo 17, com um acumulado de 16,30 mm. O mínimo durante essa época foi de 4,05 mm no quinquídeo 10.

O período intermediário foi marcado em duas ocasiões: durante a época de poucas chuvas e com altas precipitações pluviais. Durante o primeiro período houve um rápido decréscimo das taxas de ETR, já que há uma dependência do modelo com a diferença entre precipitação e ETc (P-ETc), ou seja, se a precipitação diminui, ocorre uma tendência da ETR decrescer. Houve um decréscimo de 13,26 mm, durante o 26º quinquídeo para 1,76 mm no quinquídeo posterior, representando uma queda de 86,72%. A taxa mínima durante esse período foi de 0,09 mm, durante o quinquídeo 36. Após o início das chuvas, houve um acréscimo significativo nas taxas de ETR 3, juntamente com uma oscilação da mesma, devido à variação da precipitação pluvial. Observa-se um pico de 30,03 mm durante o 37º quinquídeo, observando-se ainda uma proximidade dos valores entre ETR 1 e ETR 3 nos quinquídeos 45 ao 60. O período intermediário correspondeu com 50,98% do total no ciclo. A fase final correspondeu com um decréscimo lento das taxas de ETR 3, variando de 26,25 a 1,64 mm quinquídeo⁻¹ durante os quinquídeos 63 e 84, respectivamente.

A análise de regressão para a ETR observada pelo método Penman-Monteith FAO “Kc dual” (ETR 1), comparado com o método do balanço hídrico de cultivo (ETR 3), bem como os coeficientes estatísticos “d” de Willmont, desvio de porcentagem (DP) e raiz

quadrada do erro médio (RMSE), são apresentadas pelas Figuras 14 e Tabela 9. Observa-se através do gráfico que houve uma subestimativa dos valores de ETR 3 comparado com ETR1, bem como apresentou uma correlação (r) dos dados de 0,81 com desvio de porcentagem de 5,31%. A exatidão observada por este método foi semelhante aos métodos ETR 2,a e ETR 2,c ($d = 0,90$), apresentando uma RMSE de 5,31 mm em relação à média.

Figura 14 –Correlação da evapotranspiração real pelo método Penman-Monteith FAO “Kc dual” (ETR 1) e o método do balanço hídrico de cultivo (ETR 3).



Fonte: Autor, 2012.

Tabela 9- Índice de concordância (d), desvio de porcentagem (DP) e raiz quadrada do erro médio (RMSE) para o método do balanço hídrico de cultivo (ETR 3) comparado com Penman-Monteith FAO “Kc dual” (ETR 1) em um cultivo de cana-de-açúcar na Região de Rio Largo-AL.

Método	Média (mm quinquédeo ⁻¹)	d	DP (%)	RMSE (mm)
ETR 3	12,53	0,90	-3,46	5,31

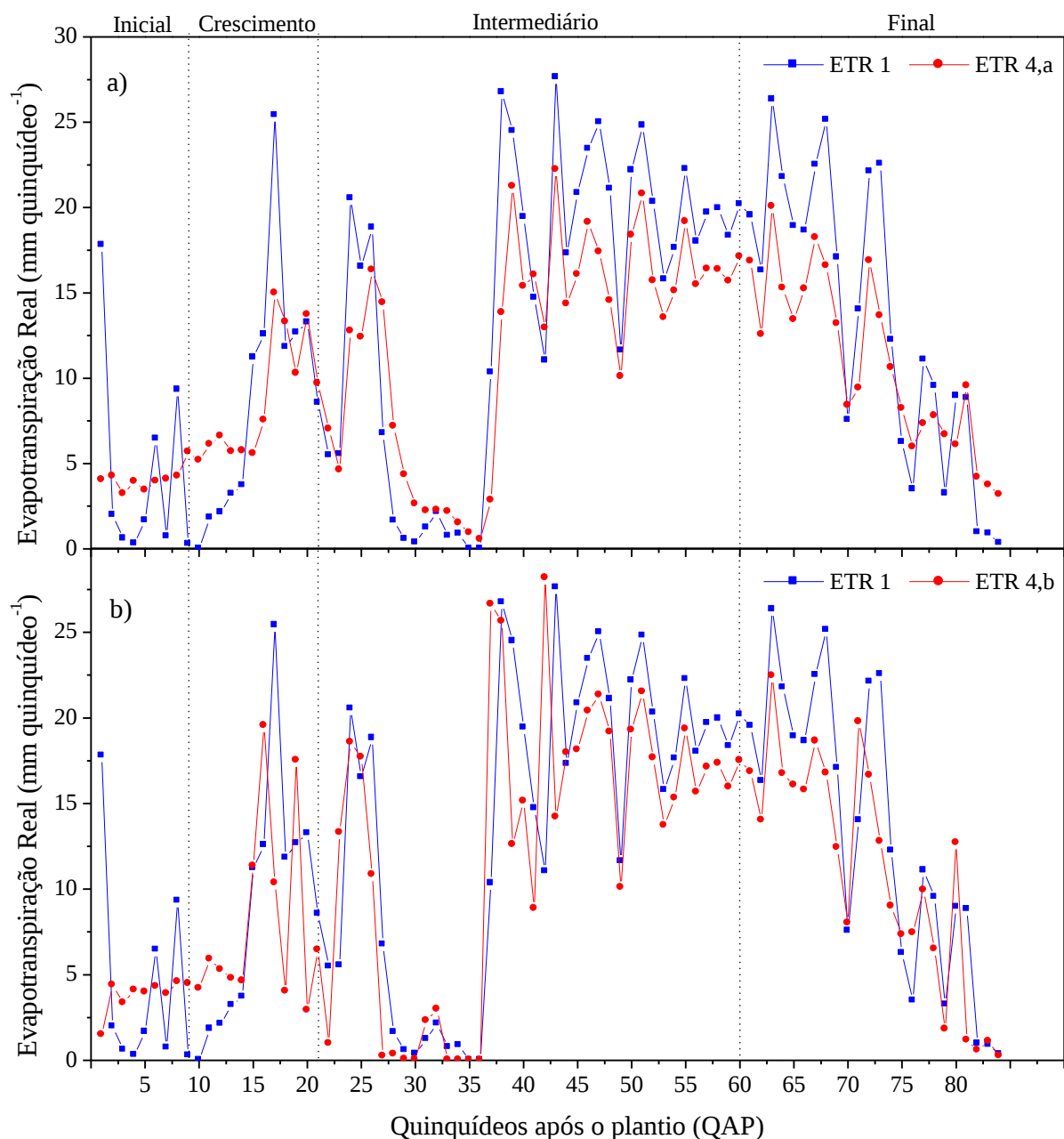
Fonte: Autor, 2012.

4.4.4 ETR 4 – Método Penman-Monteith FAO Kc único

A Figura 15 mostra a relação entre a evapotranspiração calculada pelo método Penman-Monteith FAO “Kc dual”(ETR 1) e pelos métodos de evapotranspiração real por Penman-Monteith FAO “Kc único”, calculado por diferentes coeficientes de redução (K_s), ETR 4,a (Figura 15a) e ETR 4,b (Figura 15b), respectivamente. Observa-se que há uma semelhança entre ambas ETR 4 durante o período inicial e de crescimento, havendo diferença

também entre os valores calculados por ETR 1 e ETR 4. Durante o ciclo inicial da cultura, tem-se que ETR 4,a teve uma variação superior de aproximadamente 8% comparado com ETR 4,b, em que os valores máximos acumulados foram de 5,76 e 4,92 mm durante o nono quinquêdeo. As menores taxas de evapotranspiração real durante esse período foram constatadas no terceiro quinquêdeo, com valores de 3,35 e 3,10 mm para ETR 4,a e ETR 4,b, respectivamente.

Figura 15 – Evapotranspiração pelo método Penman-Monteith FAO “Kc dual” (ETR 1) e pelo método do balanço hídrico de cultivo (ETR 3), para um cultivo de cana-de-açúcar em Rio Largo, AL.



Fonte: Autor, 2012.

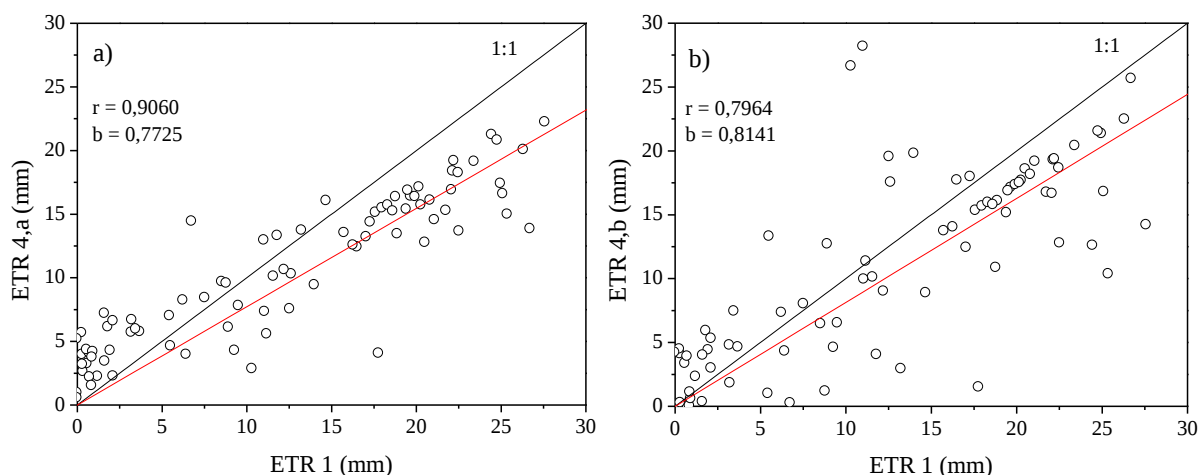
Já no período de crescimento, houve uma elevação nos valores de evapotranspiração real da cultura para os três métodos avaliados e que o pico de ETR acumulada, para os três métodos, foi observado no 17º quinquídeo. Durante esse quinquídeo, ETR 4,a contribuiu com 12,12% em um total de 92,10 mm no período de crescimento. ETR 4,b apresentou um valor máximo de 10,51 mm, representando 11,45% de 91,73 mm para esse mesmo período. Os valores mínimos encontrados foram de 5,39 e 4,78 mm durante o décimo quinquídeo para ETR 4,a e ETR 4,b, respectivamente. Observou-se um acumulado de 877 (média de 2,07 mm d⁻¹) e 891 mm (média de 2,11 mm d⁻¹) para ETR 4,a e ETR 4,b, respectivamente para todo período de cultivo.

O período intermediário foi marcado por um rápido decréscimo da evapotranspiração real, durante a época com precipitação acumulada inferior a 5 mm. As menores taxas que foram observadas durante essa época foram de 0,48 e 0,33 mm, para ETR 4,a e ETR 4,b, respectivamente, ambos durante o 36º quinquídeo. Após esse quinquídeo, tem-se um acréscimo de evapotranspiração decorrente do início das chuvas, onde as taxas de ETR 1 mantiveram-se acima das observadas pelo método ETR 4. Durante os quinquídeos 53 ao 61 os valores para ETR 4,a e ETR 4,b mantiveram-se iguais, variando de 13,53 mm (53º QAP) a 19,21 mm (55º QAP), 14,20 e 13,66% abaixo da ETR1, respectivamente. Essa época foi aquela que contribuiu com uma maior quantidade de taxa evapotranspirativa, correspondendo a 51,24% do total de 819 mm para ETR 4,a e 47,54% de 844 mm para ETR 4,b. O período final foi marcado por um decréscimo da evapotranspiração real da cultura. Os máximos observados para ETR 4,a e ETR 4,b foram 20,78 mm e 20,89 mm, respectivamente, ambos durante o 63º quinquídeo. Os mínimos foram constatados durante o último quinquídeo de cultivo, com taxas de 2,68 e 3,78 mm para ETR 4,a e ETR 4,b, respectivamente.

A análise de regressão para evapotranspiração real calculada pelo método Penman-Monteith FAO “Kc dual” (ETR 1), comparado com o método Penman-Monteith FAO “Kc único” (ETR 4) com diferentes coeficientes de redução (Ks), os coeficientes estatísticos “d” de Willmont, desvio de porcentagem (DP) e raiz quadrada do erro médio (RMSE), são apresentadas pelas Figuras 16 e Tabela 10. Observa-se que ambos os modelos subestimaram ETR 1, onde ETR 4,a apresentou um maior coeficiente de correlação ($r = 0,90$) comparado ao ETR 4,b ($r = 0,79$), indicado uma baixa correlação para os dados calculados com Ks₂ definido entre a razão da ETR 3/ETc. Apesar dessa diferença entre correlação, houve uma proximidade entre os resultados encontrados para concordância dos dados ($d = 0,90$ e $0,88$ – para ETR 4,a e ETR 4,b, respectivamente). Observa-se ainda que o coeficiente angular (b) manteve-se

abaixo de zero, para ambos os casos, para uma relação de $Y=b.X$. Os desvios percentuais para ETR 4,a e ETR 4,b foram respectivamente 14,00 e 12,33%. A raiz quadrada do erro médio manteve-se na faixa, comparado com os demais métodos avaliados, onde ETR 4,a apresentou uma RMSE menor que ETR 4,b.

Figura 16 – Correlação da evapotranspiração real pelo método Penman-Monteith FAO “Kc dual” (ETR 1) e o método Penman-Monteith FAO “Kc único” (ETR 4), onde: ETR 4,a ($ETC \cdot K_{s1}$) e ETR 4,b ($ETC \cdot K_{s2}$), em que o Ks foi determinado por ETR/ET_c .



Fonte: Autor, 2012.

Tabela 10 – Índice de concordância (d), desvio de porcentagem (DP) e raiz quadrada do erro médio (RMSE) para os métodos Penman-Monteith FAO “Kc único” (ETR 4,a e ETR 4,b), comparado pelo método Penman-Monteith FAO “Kcdual” (ETR 1) em um cultivo de cana-de-açúcar na Região de Rio Largo-AL.

Método	Média (mm quinquídeo ⁻¹)	d	DP (%)	RMSE (mm)
ETR 4,a	10,41	0,90	-14,00	4,56
ETR 4,b	10,61	0,88	-12,33	5,52

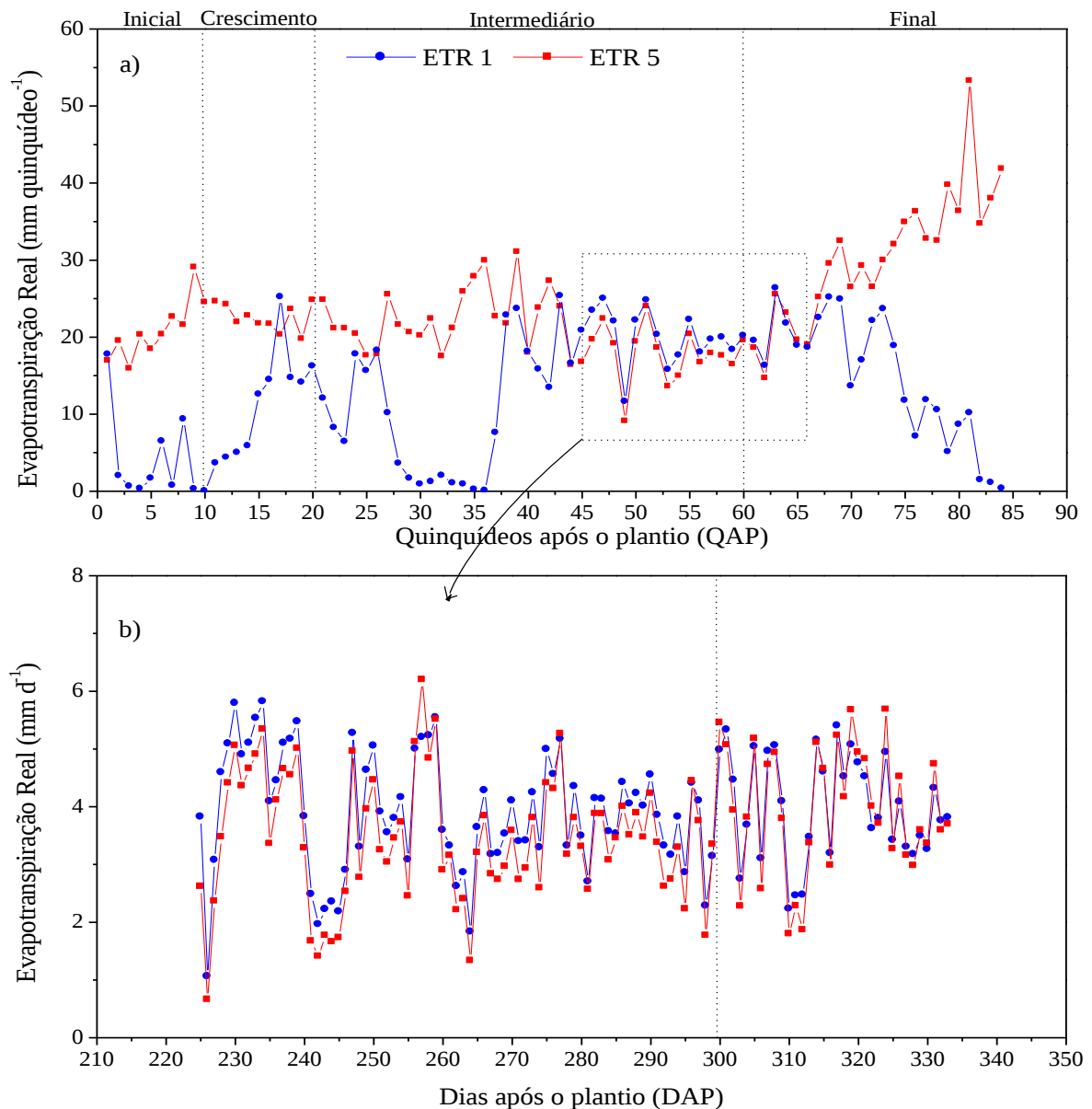
Fonte: Autor, 2012.

4.4.5 ETR 5 – Método de Penman-Monteith com Resistência da Superfície do Dossel

O comparativo entre a evapotranspiração real calculada pela metodologia de Penman-Monteith FAO “Kc dual” (ETR 1) e pelo método Penman-Monteith com resistência estomática (ETR 5) encontram-se na Figura 17. Observa-se que durante o seu ciclo ocorreu total discordância entre os dados observados por ETR 1 e calculados por ETR 5 para os períodos com baixa precipitação. O fato do cultivo ser em sequeiro pode ter proporcionado esta diferença. O total evapotranspirado por essa metodologia foi aproximadamente 1992 mm

em todo período de cultivo, aproximando-se à ETC durante o mesmo período (1948 mm), observando o estresse hídrico sofrido pela cultura da cana-de-açúcar de acordo com os valores de ETR 5. Durante o período inicial, ETR 5 aumentou gradativamente onde o total (184,56 mm) foi 4,72 vezes superior a ETR 1. Observa-se, porém, que durante o quinquêdeo 17 houve um pico de ETR 1, ultrapassando o acumulado de ETR 5 para o mesmo período. Esse aumento repentino foi decorrente a um aumento da chuva efetiva nos dois quinquêdeos anteriores. Durante o período de crescimento, ETR 5 acumulou 13,7% do total evapotranspirado durante todo período de cultivo.

Figura 17 – Evapotranspiração pelo método Penman-Monteith FAO “Kc dual” (ETR 1) e pelo método Penman – Monteith com resistência estomática (ETR 5) para um cultivo de cana-de-açúcar em Rio Largo, AL.



Já o período intermediário foi aquele que contribuiu com a maior quantificação de ETR 5 (40,21% de 1992,34 mm). Observa-se, porém que durante o período chuvoso (Figura 3; Figura 17b) ocorre uma assimilação entre os dados observados por ETR 1 comparados com ETR 5 (dias 225 até 333). A quantificação pluviométrica juntamente com a baixa radiação solar durante esse período fez com que ambos os modelos se assemelhassem. Durante esse período, ocorreu uma melhor eficiência hídrica para ambos os modelos, já que a chuva efetiva foi de 1121,99 mm, 94,9% do total precipitado, sendo efetivamente utilizado pela cultura e armazenado no solo. Esses fatores fizeram com que ocorresse abertura dos estômatos, evapotranspirando cerca de 35% da água que estava disponibilizada no solo. Do total de evapotranspiração real nesse período (109 dias), 68,8% encontram-se na fase intermediária, totalizando 258,15 mm de ETR 5. Já o período final correspondeu a 31,2% (134,88 mm de ETR 5). Nessa mesma época (Figura 17b) para ETR 1 quantificou-se 291,27 e 136,24 mm para os períodos intermediário e final, respectivamente.

Após o período com altas precipitações pluviais ocorreu um intenso incremento de ETR 5 (Figura 17a), observando-se que o comportamento de ETR 5 foi inversamente proporcional ao ETR 1. Enquanto ETR 5 acumulou 731,85 mm durante essa época, o método de Penman – Monteith “Kc dual” incrementou menos da metade (48,79% de ETR 5). Durante essa época houve um aumento do saldo de radiação, juntamente com o déficit de pressão de vapor, aumentando os valores da ETR, já que a resistência estomática durante esse período foi considerado constante, podendo ETR 5 está em fator com essas variáveis.

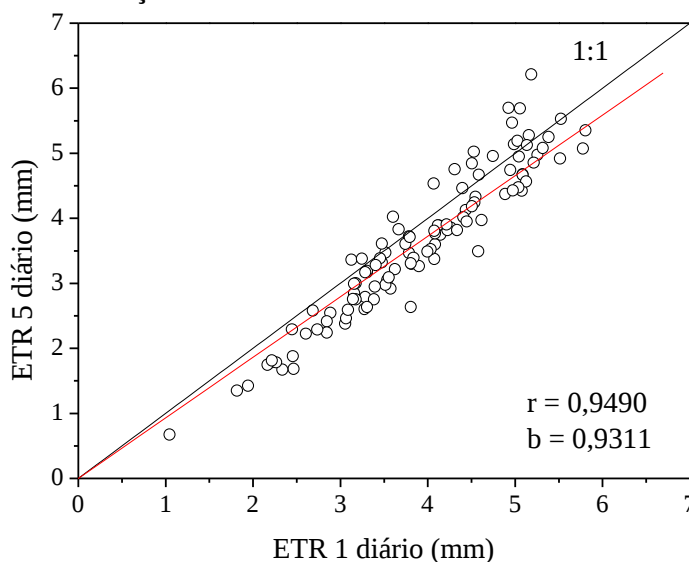
A análise de regressão para evapotranspiração real calculada pelo método Penman-Monteith FAO “Kc dual” (ETR 1), comparado com o método Penman-Monteith com resistência estomática (ETR 5), os coeficientes estatísticos “d” de Willmont, desvio de porcentagem (DP) e raiz quadrada do erro médio (RMSE), são apresentadas pelas Figuras 18 e Tabela 11, respectivamente.

Tabela 11 – Índice de concordância (d), desvio de porcentagem (DP) e raiz quadrada do erro médio (RMSE) para o método Penman-Monteith com resistência estomática (ETR 5) comparado com o método Penman-Monteith FAO “Kcdual” (ETR 1) em um cultivo de cana-de-açúcar na Região de Rio Largo-AL, no período de 225 a 333 DAP.

Método	Média (mm d⁻¹)	d	DP (%)	RMSE (mm)
ETR 5 diário	3,60	0,99	-7,86	0,47

Fonte: Autor, 2012.

Figura 18 –Correlação entre a evapotranspiração real pelo método Penman-Monteith FAO “Kc dual” (ETR 1) e o método Penman-Montetih com resistência estomática (ETR 5) durante os em função diária.



Fonte: Autor, 2012.

Durante o período total de cultivo, não houve dados estatísticos confiáveis para comparação com ETR 1, devido às grandes variações ocorridas entre ambos os modelos durante as épocas de baixa precipitação pluvial, portanto, este modelo não servirá para comparações durante os períodos com baixa precipitação. No entanto, tem-se que durante o período chuvoso, o modelo ETR 5 comportou-se de maneira adequada ($r = 0,94$) quando comparado com ETR 1 (Figura 17). Houve uma subestimativa ao comparar-se os dois métodos, com coeficiente angular “b” de 0,9311. Essa excelente relação comprova a adequação do método ETR 5 em ambiente úmido, onde ocorreram grandes quantidades de chuva. A comprovação da discrepância dos dados de ETR 5 estão descritos no alto valor do desvio de porcentagem ($DP = 84,90$) e na alta raiz quadrada do erro médio, indicando que não há precisão entre os dados observados por ETR 1 e estimados por ETR 5, observando-se ainda um baixo valor de “d” comparado aos outros métodos estudados. Entretanto, quando os dados são comparados durante o período chuvoso (dias 225 até 333) ocorre uma perfeição nos dados, o índice de concordância chega perto de 1. O baixo valor do desvio de porcentagem comprova a proximidade dos valores com a reta 1:1 e a baixa RMSE mostra um melhor ajuste para essa época.

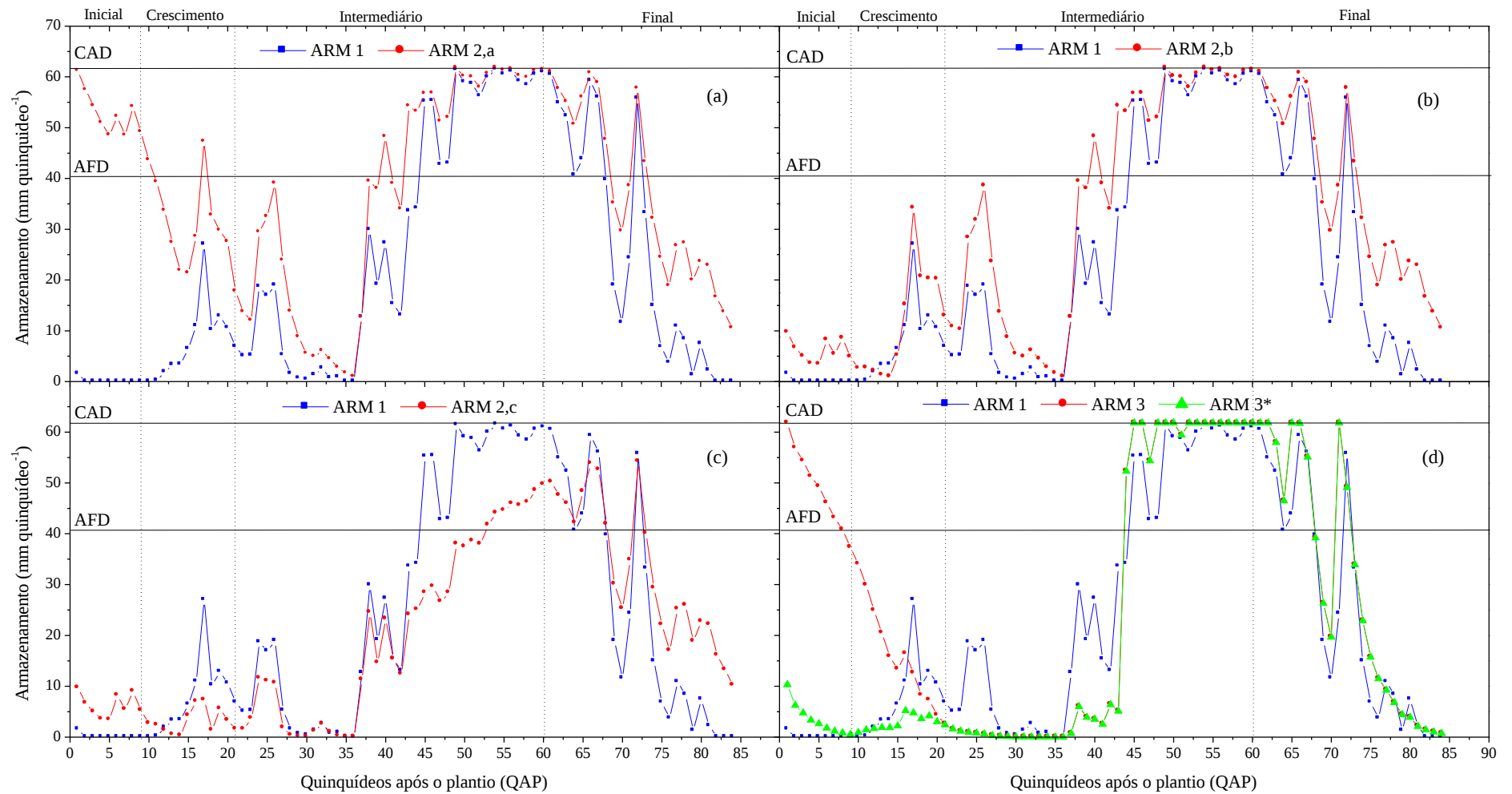
4.5 Condições Hídricas do solo

O armazenamento de água no solo (ARM) obtido por diferentes métodos são apresentados na Figura 19. Observa-se que a ocorrência de variação no ARM é devido aos

métodos calcularem o conteúdo de água no solo para o perfil completo do perfil do solo (0,60 m) (Figura 19a) e de acordo com o crescimento do perfil radicular (Figura 19b). Observa-se semelhante tendência dos valores de ARM 2,b e ARM 2,c durante o período inicial (Figura 19b e c), onde os valores mínimos foram 3,38 e 3,39 mm respectivamente (quinto quinquídeo). Os valores máximos foram iguais para ambos os métodos, com 9,68 mm no primeiro quinquídeo. O ARM 2,a e ARM 3 apresentaram maiores valores, visto que a capacidade de água disponível para estes foi considerada para os 60 centímetros de profundidade do solo (CAD = 61,8 mm), onde seus máximos foram de 48,43 (quinquídeo 7) e 37,30 mm (quinquídeo 9) para ARM 2,a e ARM 3, respectivamente (Figura 19a e d). Os valores máximos para ambos foram observados durante o primeiro quinquídeo, onde ARM 3 chegou a CAD e ARM 2,a foi igual a 61,15 mm. A modificação do armazenamento de Thornthwaite e Mather (1955) para contagem no perfil radicular apresentou diferença quando comparado com o método original (Figura 19d). Seu valor mínimo, apesar de ser durante o mesmo quinquídeo (nove), foi aproximadamente 98% inferior comparado com ARM 3, com 0,52 mm. Os valores máximos foram observados durante o primeiro quinquídeo com 61,8 e 10,3 mm para ARM 3 e ARM 3*. O ARM 1 foi nulo durante todo o período inicial.

Durante o período de crescimento da cultura houve uma tendência dos ARM 2,b e ARM 2,c apresentarem seus valores mínimos durante o quinquídeo 14 (0,91 e 0,24 mm para ARM 2,b e ARM 2,c, respectivamente), enquanto os máximos foram observados durante o 17º quinquídeo, com 34,13 e 7,27 mm respectivamente. Essa diferença entre os valores deve-se ao fato do crescimento radicular apresentar-se em crescimento, comparado com ARM 2,b. O valor máximo para ARM 3 e o mínimo para ARM 3* observados no quinquídeo 10 (34,02 e 0,90 mm, respectivamente), foram assim encontrados devido ao ARM 3 ainda apresentar um decaimento dos valores devido à falta de precipitação pluvial (Figura 19d), enquanto ARM 3* ao considerar-se somente o perfil inicial do solo, mostra-se com valores mínimos. O mínimo para ARM 3 foi observado durante o quinquídeo 21 (2,57 mm), enquanto o máximo do ARM 3* foi de 5,23 mm, no quinquídeo 16. Os valores máximos de ARM 1 e ARM 2,a foram observados durante o quinquídeo 17 (24,96 e 47,23 mm respectivamente), enquanto os mínimos ocorreram aos quinquídeos 10 ao 12 para ARM 1 (sem ocorrência de armazenamento) e 17,71 mm para ARM 2,a (quinquídeo 21).

Figura 19 – Variação no armazenamento de água no solo através de três métodos: Allen et al. (1998) – ARM 1; Nullet e Giambelluca (1988) – ARM 2,a e suas modificações – ARM 2,b e ARM 2,c e Thornthwaite e Mather (1955) – ARM 3 e ARM 3*, para um cultivo de cana-de-açúcar em Rio Largo, Alagoas.



Fonte: Autor, 2013.

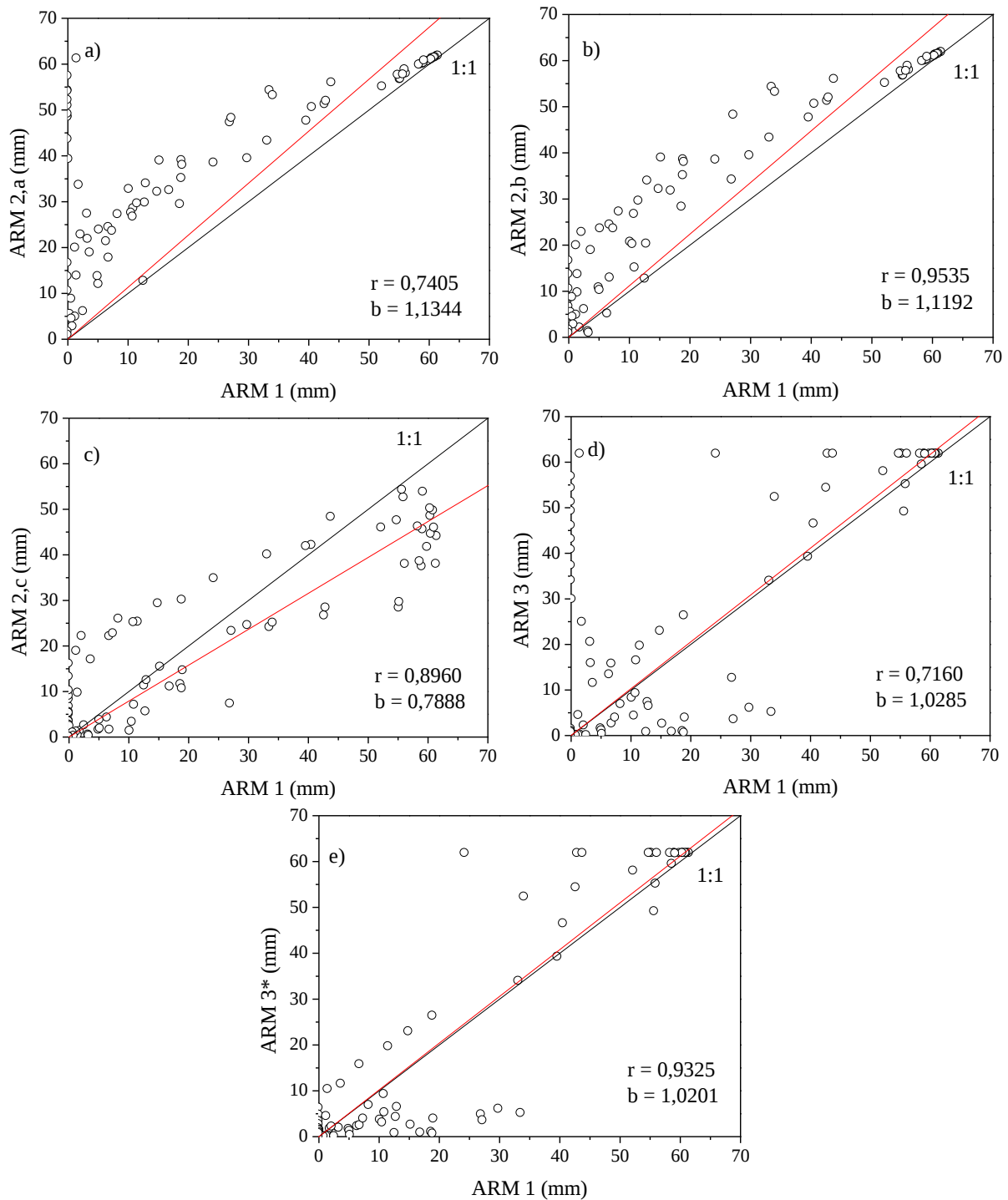
O período intermediário e final foram aqueles que apresentaram seus valores entre a CAD e a água facilmente disponível (AFD), correspondente à água que pode ser facilmente utilizada pelo sistema radicular da planta, onde aproximadamente 40% dos dias estavam acima da AFD para os métodos estudados, durante esse período. O ARM 2,a e ARM 2,b corresponderam a 29 dos 63 dias correspondentes aos períodos inicial e final, seguidos dos ARM 3 e ARM 3* com 26 dias na AFD. Os métodos ARM 1, ARM 2,c e ARM 3* foram aqueles que tiveram menores quantidades de dias na faixa da AFD. O período intermediário foi marcado por dois extremos, um período seco com baixos valores no armazenamento e outro com altas precipitações e consequente alto armazenamento de água no solo.

Os valores mínimos ocorreram todos no quinquídeo 36, onde variou de zero (ARM 1, ARM 3 e ARM 3*) a 0,91 mm (ARM 2,a e ARM 2,b). Os máximos foram observados em ARM 2,a e ARM 2,b no 54º quinquídeo, quando o armazenamento chegou à CAD e que, durante esse mesmo quinquídeo, ARM 1 chegou a sua máxima capacidade. O ARM 3 e ARM 3* permaneceram na CAD durante 14 dos 39 quinquídeos no período intermediário. A época de desenvolvimento final correspondeu ao decréscimo dos valores no armazenamento, ocasionado pelo decréscimo das precipitações durante esse mesmo período. Os valores mínimos ocorreram durante a mesma época (quinquídeo 84), variando de zero (ARM 1) a 10,51 (ARM 2,a e ARM 2,b). Os máximos foram encontrados no 61º quinquídeo para ARM 1; ARM 2,a; ARM 2,b; ARM 3 e ARM 3* (60,41; 60,94; 60,94; 61,80 e 61,80 mm, respectivamente).

A análise de regressão para o armazenamento calculado pelo método Penman-Monteith FAO “Kc dual” (ARM 1), comparado com os métodos de água disponível original (ARM 2,a), suas modificações (ARM 2,b e ARM 2,c) e pelo método do balanço hídrico de cultivo (ARM 3) e os valores de RMSE, “d” e porcentagem de desvio são descritos na Figura 20 e Tabela 12. De acordo com a análise de regressão, apenas ARM 2,c subestimou seus valores comparado à ARM 1, com desvio de 2,94% (Figura 20c e Tabela 12). A maior superestimativa foi observada pelo ARM 2,a, obtendo uma PD de 70,29%, seguido do ARM 2,b e ARM 3, com porcentagens de 35,04 e 28,54%, respectivamente. O maior coeficiente de correlação foi observado quando ARM 1 foi comparado com ARM 2,b (Figura 20b), seguido do ARM 3* (Figura 20e) e o menor foi encontrado quando o ARM 1 foi comparado com ARM 2,a, com coeficiente de 0,74. Apesar do razoável valor do coeficiente de correlação do ARM 2,c (0,89), este apresentou um baixo RMSE (8,89 mm), seguido do ARM 3*, com

RMSE de 1,57 mm (Tabela 12). Portanto, os ARM 2,c e ARM 3* podem ser utilizados para cálculo de armazenamento do solo ao longo de perfil de crescimento da raiz.

Figura 20 – Correlação entre o Armazenamento obtido método Penman-Monteith FAO Kc “dual” (ARM 1), método da água disponível original (ARM 2,a), suas modificações (ARM 2,b e ARM 2,c) e Balanço hídrico de cultivo (ARM 3) e modificação (ARM3*) para um cultivo de cana-de-açúcar em Rio Largo – AL.



Fonte: Autor, 2013.

Tabela12 – Índice de concordância (d), desvio de porcentagem (DP) e raiz quadrada do erro médio (RMSE) para os métodos de armazenamento de água no solo comparado com o método Penman-Monteith FAO “Kc dual” (ARM 1) em um cultivo de cana-de-açúcar na Região de Rio Largo-AL.

Método	Média (mm quinquídeo⁻¹)	d	PD (%)	RMSE (mm)
ARM 2,a	38,03	0,74	70,29	22,16
ARM 2,b	30,16	0,92	35,04	10,48
ARM 2,c	20,34	0,93	-8,89	10,97
ARM 3	28,71	0,81	28,54	19,53
ARM 3*	21,98	0,94	1,57	9,53

Fonte: Autor, 2013.

Comparam-se ainda os valores calculados com o armazenamento real (ARMreal) obtido experimentalmente com os valores calculados por ARM 1; ARM 2 e modificações e ARM 3 durante os quinquídeos 51 ao 80, gerando valores de correlação linear, coeficiente angular, índice de concordância “d”, porcentagem de desvio (PD) e raiz quadrada do erro médio (RMSE) são descritos na Figura 21 e Tabela 13. Os valores de ARM 3* não foram utilizados devido estes serem iguais aos valores de ARM 3 nesse período.

Tabela 13 – Índice de concordância (d), desvio de porcentagem (DP) e raiz quadrada do erro médio (RMSE) para os métodos de armazenamento de água no solo comparado com o armazenamento real do solo medido com TDR (ARM real) em um cultivo de cana-de-açúcar na Região de Rio Largo-AL, durante os 241 aos 404 DAP.

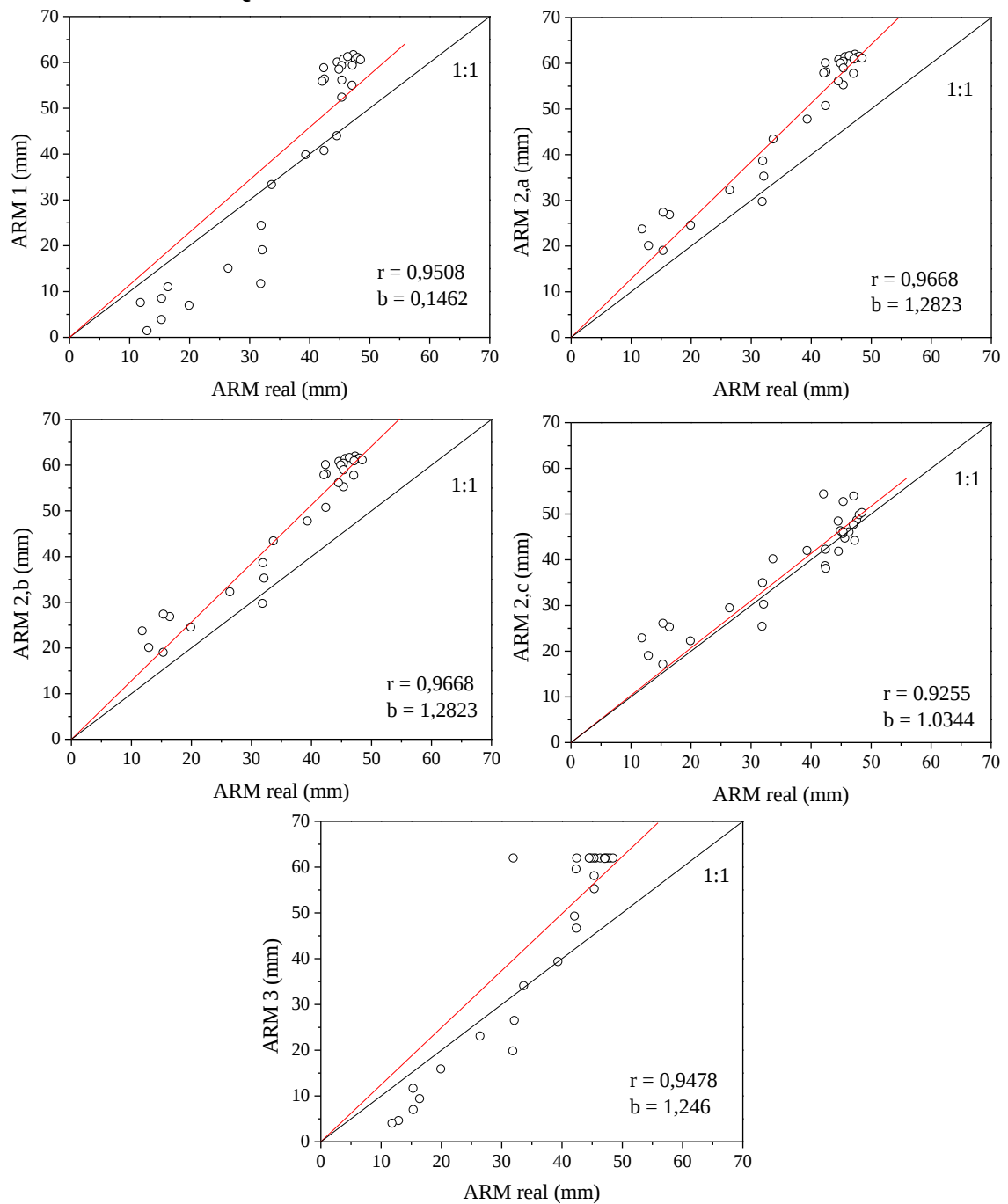
Método	Média (mm)	d	PD	RMSE (mm)
ARM 1	40,00	0,88	8,34	2,89
ARM 2,a	47,65	0,83	29,03	31,94
ARM 2,b	47,65	0,83	29,03	31,94
ARM 2,c	38,99	0,95	5,60	10,96
ARM 3	44,22	0,85	9,81	9,81

Fonte: Autor, 2013.

Observa-se que todos os métodos apresentaram coeficiente de correlação (r) acima de 0,90 quando comparados com o ARM real medido pelo TDR. Porém, apesar do ARM 2,c apresentar o menor valor de “r”, este demonstrou índices mais aceitáveis de concordância (d = 0,95) com baixo desvio de porcentagem e razoável RMSE. O ARM 3 apresentou um coeficiente de correlação maior de 0,85 (Tabela 13) superestimando seus valores quando comparado com o armazenamento real, com porcentagem de desvio para esse método de 9,81%. Quando se comparou o ARM 1 com os dados medidos, observaram-se índices satisfatórios, com o menor RMSE, comprovando a significância desse método, utilizado

largamente para planejamento de irrigação em cultivos agrícolas (ALLEN et al., 2005; ALLEN et al., 2011)

Figura 21 – Correlação entre o Armazenamento real (ARM real) comparado com o obtido método Penman-Monteith FAO Kc “dual” (ARM 1), método da água disponível original (ARM 2,a) e modificações (ARM 2,b e ARM 2,c) e Balanço hídrico de cultivo (ARM 3) para um cultivo de cana-de-açúcar em Rio Largo – AL, durante os 50 aos 81 QAP.



Fonte: Autor, 2013.

5 CONCLUSÕES

Os métodos Nullet e Giambelluca (ETR2,a) e Método Penman-Monteith FAO “Kc único” com ETR2,a/ETc (ETR4,a) foram os que apresentaram melhores indicadores estatísticos, comparados com o Penman-Monteith FAO “Kc dual” (ETR 1). O método Thornthwaite e Mather (ETR 3) e Nullet e Giambelluca com crescimento radicular determinado pelo IAF (ETR2,c), mostraram-se adequados na determinação da ETR.. O método Penman-Monteith FAO com resistência da superfície do dossel (ETR 5) adequou-se melhor no período sem restrição hídrica;

Os métodos modificados para calculo do armazenamento no perfil radicular (ARM 2,b; ARM 2,c e ARM 3*), quando comparado com o Armazenamento calculado por Penman-Monteith FAO “Kc dual” (ARM 1), mostraram-se eficientes. Quando comparado com valores reais de umidade no solo, o armazenamento pelo método Nullet e Giambelluca com crescimento radicular determinado pelo IAF (ARM 2,c) apresentou melhores coeficientes estatísticos.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, A. C. S. et al. Desenvolvimento vegetativo e produção de variedades de cana-de-açúcar em relação à disponibilidade hídrica e unidades térmicas. **Ciênc. agrotec.**, Lavras, v.32, n.5, p.1441-1448, set/out. 2008.
- ALLEN, R. G. Penman-Monteith equation. In: HILLEL, D. **Encyclopedia of soils in the environment**. p.180 – 188, 2005.
- _____. Using the FAO-56 dual crop coefficient method over an irrigated region as part of an evapotranspiration intercomparison study. **Journal of Hydrology**. Elsevier, [S.l.: s.n.], v.229, p. 27-41, 2000.
- _____. et al. Operational estimates of reference evapotranspiration. **Agronomy Journal**, v.81, p. 650-662, 1989.
- _____. et al. Evapotranspiration information reporting: I Requirements for accuracy in measurement. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.98, p. 899-220, 2011a.
- _____. et al. Satellite-based ET estimation in agriculture using SEBAL and METRIC. **Hydrological Processes**, v. 25, p. 4011-4027, 2011b.
- _____. et al. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Irrigation and Drainage Paper 56, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.1998, 300p.
- _____. et al. FAO-56 dual crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions. **Journal of irrigation and drainage engineering**, p 2-13, jan-feb. 2005.
- AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (ASCE-EWRI). The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation. **American Soc. Civil Engineers**. [S.l. : s.n.], 2005, 70p.
- BRITO, A, S.; LIBARDI, P, L.; GHIBERTO, P, J. Componentes do balanço de água no solo com cana-de-açúcar, com e sem adubação nitrogenada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, MG, v.33, p. 295-303, 2009.
- BRITO, J. E. D. de. **Calendário agroclimático para a cultura do milho na região de Arapiraca-AL**. 2009. 62f. Dissertação (Mestrado em Agronomia: Produção Vegetal) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 2009.
- CAMPBELL, G. S.; DIAZ, R. Simplified soil-water balance models to predict crop transpiration. In: BIDINGER, F. R.; JOHANSEN, C. **Drought research priorities for the dry land tropics**. Parancheru, India: Icrisat, p. 15-26, 1988.
- CARVALHO, O. M. **Classificação e caracterização físico-hídrica de solos de Rio Largo-AL, cultivados com cana-de-açúcar**. 2003. 74f. Dissertação (Mestrado em Agronomia: Produção Vegetal) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 2003.

CHAVAN, M. L.; KHODKE, U. M.; CHANGADE, N. M. Estimation of crop water requirement for irrigation planning in a semi arid region. **International Journal of Agricultural Engineering**, v.2, n. 2, p.236-242, 2009.

CHIEW, F. S. H.et al. Penman – Monteith, FAO-24 reference crop evapotranspiration and class-A pan data in Australia. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.28, p. 9-21, 1995.

CICHOTA, R.; VAN LIER, Q. J. Avaliação no campo de um TDR segmentado para estimativa da umidade do solo. **Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental**. Campina Grande, PB, v.8, n.1, p. 72-78, 2004.

COELHO, E. F.; VELLAME, L. M.; COELHO FILHO, M. A. Sonda de TDR para estimativa da umidade e condutividade elétrica do solo, com uso de multiplexadores. **Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental**, Campina Grande, PB, v.9, p. 475-480, 2005.

CONAB. Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar, safra 2012/2013 – terceiro levantamento. **Companhia Nacional de Abastecimento**, Brasília: CONAB, 2013.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water**. FAO Irrigation and Drainage Paper 33. Rome: Food and Agriculture Organization of United Nation, 1979.

_____; PRUITT, W. O. **Guidelines for predicting crop water requirements**.FAO Irrigation and Drainage Paper 24. Rome: Food and Agriculture Organization of United Nations, 1977.

EITZINGER, J.et al. A simulation study of the effect of soil water balance and water stress on winter wheat production under different climate change scenarios. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, n.61, v.3, p.195-217, 2003.

EVETT, S. R.et al. Single- and dual-surface iterative energy balance solutions for reference ET. **Advances in irrigation**, American Society of Agricultural and Biological Engineers, v. 55, n.2, p. 533-541, 2012.

FAO. **FAOSTAT online database**, Food Agriculture Organization disponível em: <<http://faostat.fao.org>> Acesso em 15 ago. 2012.

FARIA, R. T.; MADRAMOOTOO, C. A. Simulation of soil moisture profiles for wheat in Brazil. **Agricultural water management**. Amsterdam, v.31, p. 35-49, 1996.

FERREIRA JUNIOR, R. A. Crescimento de variedades RB de cana-de-açúcar irrigadas e fotossíntese modelada pela radiação solar. 2010. 68f. Dissertação (Mestrado em Agronomia: Produção Vegetal) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 2010.

FERREIRA JUNIOR, R. A.et al. Crescimento e fotossíntese de cana-de-açúcar em função de variáveis biométricas e meteorológicas. **Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental**. Campina Grande, PB. v. 16, n.11, p. 1229-1236, 2012.

GHIBERTO, P. J. et al. Components of the water balance in soil with sugar cane crops. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.102, p. 1-7, 2011.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Reference crop evapotranspiration from temperature. **Journal of Applied Engineering in Agriculture**, v. 1, p. 96-99, 1985.

HERMANN, E. R.; CÂMARA, G. M. S. Um método simples para estimar a área foliar de cana-de-açúcar. **STAB**, Piracicaba, v.17, n.5, p.32-34, 1999.

HOU, L. G. et al. Evapotranspiration and crop coefficient of *Populus euphratica* Oliv forest during the growing season in the extreme arid region northwest China. **Agricultural Water Management**. Amsterdam, v.97, p. 351-356, 2010.

INMAN-BAMBER, N. G. Sugarcane water stress criteria for irrigation and drying off. **Field crops research**, Amsterdam, v. 89, p. 107-122, 2004.

_____; JAGER, J. M. The reaction of two varieties of sugarcane to water stress. **Field crops research**, Amsterdam, v.14, p. 15-28, 1986.

_____; MC GLINCHEY, M. G. Crop coefficients and water-use estimates for sugarcane based on long-term Bowen ratio energy balance measurements. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.83, p. 125-138, 2003.

_____; SMITH, D. M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, p. 185-202, 2005.

JADOSKI, C. J. et al. Physiology development in the vegetative stage of sugarcane. **Pesquisa aplicada e agrotecnologia**, Paraná, v.3, n.2, p.169-176, 2010.

JENSEN, M. E., 1968. Water consumption by agricultural plants. 1 – 22. In: KOZLOWSKI, T. T. (Ed), **Water Deficits and Plant Growth**, v.2, Academic Press, New York, 401p.

JONES, S. B.; WRAITH, M.; OR, D. Time domain reflectometry measurement principles and applications. **Hydrological Processes**, 16, p. 141-153, 2002.

KASSAM, A.; SMITH, M. FAO methodologies on crop water use and crop water productivity. **Expert meeting on crop water productivity, paper CWP – M07**, Rome, 2001.

KATO, T.; KIMURA, R.; KAMICHIKA, M. Estimation of evaporation, transpiration ratio and water-use efficiency from a sparse canopy using a compartment model. **Agricultural water management**, Amsterdam, v.65, p. 173-191, 2004.

LHOMME, J. P.; GOMEZ, L.; JARAMILLO, A. Modelo matemático del balance hídrico. **Turrialba**, v. 34, n. 4, p. 503-507, 1984.

LIU, C.; ZHAGH, X.; ZHANG, Y. Determination of daily evaporation and evapotranspiration of winter wheat and maize by large-scale weighing lysimeter and micro-lysimeter. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.111, p. 109-120, 2002.

LIU, Y.; LUO, Y. A consolidated evaluation of the FAO-56 dual crop coefficient approach using the lysimeter data in the North China Plain. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 97, p. 31-40, 2010.

LYRA, G. B. et al. Evapotranspiração da cultura de cana-de-açúcar na região de Tabuleiros Costeiros do estado de Alagoas: coeficiente da cultura “único” padrão boletim FAO-56. **STAB**, v. 25, n.4, p. 40-43, 2007a.

LYRA, G. B. et al. Evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar na região de Tabuleiros Costeiros do estado de Alagoas: coeficiente da cultura “dual” padrão boletim FAO – 56. **STAB**, v.25, n.5, p. 44-51, 2007b.

LYRA, G. B. et al. Coeficiente da cultura da cana-de-açúcar no estágio inicial de desenvolvimento em Campos dos Goytacazes, RJ. **Irriga**, Botucatu, v. 17, n. 1, p. 102-113, jan-mar., 2012.

LOAGUE, K.; GREEN, R.E. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: Overview and application. **Journal of Contaminant Hydrology**, v. 7, p. 51-73, 1991.

MARIN, F. R. et al. Cana-de-açúcar. In: MONTEIRO, J. E. B. A. **Agrometeorologia dos cultivos, fator meteorológico na produção agrícola**. INMET, Brasília, DF. p.111-130, 2009.

MASTRORILLI, M. et al. Daily actual evapotranspiration measured with TDR technique in Mediterranean conditions. **Agricultural and Forest Meteorology**. v.90, p. 81-89, 1998.

MAVI, H. S.; TUPPER, G. J. Agrometeorology: principles and applications of climate studies in agriculture. **Food Products Press**. Oxford. London, 364p. 2004.

MEDEIROS, R. P. **Componentes do balanço de água e de radiação solar no desenvolvimento do milho, em quatro épocas de semeadura, no agreste de Alagoas**. 2009. 88f. Dissertação (Mestrado em Agronomia: Produção Vegetal) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 2009.

MONTEITH, J. L. **Evaporation and environment**. Symp.Soc.Exp.Biol. v.19, p. 205-234, 1965.

MORIASI, D. N. et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Amer. Soc. of Agric. and Bio. Eng.**, v.50, n.3, p.885-900, 2007.

NOBORIO, K. Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review. **Computers and electronics in agriculture**, v.31, p. 213-237, 2001.

NOILHAN, J.; PLANTON, S. A simple parametrization of land surface processes for meteorological models. **Monthly Weather Review**, v.117, p.536-549, 1989.

NULLET, D.; GIAMBELLUCA, T. W. Risk analysis of seasonal agricultural drought on low pacific islands. **Agriculturaland and Forest Meteorology**, v. 42, p. 229-239, 1988.

- OLIVEIRA, R. A. et al. Área foliar em três cultivares de cana-de-açúcar e sua correlação com a produção de biomassa. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.32, n.2, p. 71-76, 2007.
- ORTEGA-FARIAS, S. O. et al. Latent heat flux over a furrow-irrigated tomato crop using Penman-Monteith equation with a variable surface canopy resistance. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.82, p. 421-432, 2006.
- PANIGRAHI, B.; PANDA, S. N. Field of a soil water balance simulation model. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 58, p. 223-240, 2003.
- PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proc. Roy. Soc. London**, A193, p.120 – 146, 1948.
- PEREIRA, A. R. Simplificando o balanço hídrico de Thornthwaite-Mather. **Bragantia**, Campinas, SP, v.64, n. 2, p. 311-314, 2005.
- _____; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas. Guaíba: **Agropecuária**, 478p., 2002.
- RANA, G.; KATERJI, N. Measurement and estimation o factual evapotranspiration in the Field under Mediterranean climate: a review. **European Journal of Agronomy**, v.13, p. 125-153, 2000.
- RITCHIE, J. T. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. **Water resources research**, Washington, v. 8, p. 1204-1213, 1972.
- RODRIGUES, J. D. **Fisiologia de cana-de-açúcar**. Botucatu: Instituto de Biociência. Apostila, 1995.101p.
- RUSHTON, K. R.; EILERS, V. H. M.; CARTER, R. C. Improved soil moisture balance methodology for recharge estimation. **Journal of hydrology**, v.318, p. 379-399, 2006.
- SHUTTLEWORTH, W. J.; WALLACE, J. S. Evaporation from sparse crops – an energy combination theory. **Quartely Journal Real Meteorological Society**, v. 111, p.839-855.
- SILVA, B. K. N. et al. Análise de sensibilidade dos métodos de estimativa da evapotranspiração de referência e razão de Bowen em cultura de cana-de-açúcar. **Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental**, Campina Grande, PB, v.15, n.10, p.1046-1053, 2011.
- SILVA, T. G. F. et al. Biometria da parte aérea da cana soca irrigada no submédio do Vale do São Francisco. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, CE, v.43, n. 3, p.500-509, 2012a.
- _____. et al. Requerimento hídrico e coeficiente de cultura da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v.16, n. 1, p. 64-71, 2012b.
- SILVA, V. P. R. et al. Walter requirements and single and dual crop coefficients of sugarcane grown in a tropical region, Brazil. **Agricultural Sciences**, v.3, n.2, p. 274-286, 2012.

SILVA, V. P. R. et al. Risco climático da cana-de-açúcar cultivada na região Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v.17, n. 2, p.180-189, 2013.

SOUZA, J. L. et al. Análise da precipitação pluvial e temperatura do ar na região do tabuleiro costeiro de Maceió, AL, período 1972 – 2001. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 12, n. 1, p. 131-141, 2004.

TEIXEIRA, E. N. et al. Interceptação de água pelo dossel da cana-de-açúcar. **Irriga**, Botucatu, SP. v.17, n.1, p. 71-84, 2012.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. The water balance. **Publications in climatology**. New Jersey, Drexel Institute of Technology, 1955.104p.

TOJO-SOLER, C.M. **Uso do modelo Ceres-Maize para previsão de safra do milho “safrinha”**. 2004. 146 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2004.

WATANABE, K. et al. Changes in seasonal evapotranspiration, soil water content, and crop coefficients in sugarcane, cassava, and maize fields in Northeast Thailand. **Agricultural Water Management**. Amsterdam, v. 67. p. 133-143, 2004.

WILLMOT, C. J. On validation of models, **Physical Geography**, v. 2, p. 184-194, 1981.

ZHAO, C.; FENG, Z.; CHEN, G. Soil water balance simulation of alfafa (*Mendicago sativa* L.) in the semiarid Chinese Loess Plateau. **Agricultural water management**, Amsterdam, v. 69, p.101-114, 2004.