

ALBERTO MARIO ARROYO AVILEZ

**DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE CULTURA “Kc” NA CULTURA DA
CANA DE AÇÚCAR COM IMAGENS LANDSAT UTILIZANDO O MODELO SAFER
NO NOROESTE PAULISTA, BRASIL**

Botucatu

2018

ALBERTO MARIO ARROYO AVILEZ

**DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE CULTURA “K_c” NA CULTURA DA
CANA DE AÇÚCAR COM IMAGENS LANDSAT UTILIZANDO O MODELO SAFER
NO NOROESTE PAULISTA, BRASIL**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP Campus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Irrigação e Drenagem).

Orientador: Fernando Braz Tangerino Hernandez

Botucatu

2018

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por me guiar nos meus caminhos e estar sempre presente em minha vida.

Aos meus queridos pais Júlio e Yaneth e meus irmãos Carmelo e Valeria pelo apoio incondicional e sempre me aportar forças para não desistir.

À Universidade Estadual Paulista (UNESP), CAMPUS de Botucatu e ao Programa de Pós-Graduação em Irrigação e Drenagem por ter me acolhido e pela oportunidade de realização do curso de Mestrado.

Ao Prof. Dr. Fernando Braz Tangerino Hernandez, pela orientação, ensinamentos, paciência e exemplo de professor.

Ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela BOLSA de estudos concedida.

À Área de Hidráulica e Irrigação da UNESP Ilha Solteira pela orientação e ensinamentos durante o desenvolvimento do meu estudo de pesquisa.

A todos os integrantes da Área de Hidráulica e Irrigação, principalmente a Engenheira Agrônoma Regiane C. Bispo pelos ensinamentos e auxílio e a Engenheira Agrônoma Emanoelle Amendola pela ajuda no Laboratório de Hidráulica de Irrigação.

À RAIZEN e à parte de seus Colaboradores, em especial à Fernando Benvenuti, Francisco Evandro Albino, Leandro Melo, Marcelo Agudo Romão e Naiara Denuncio pelo apoio incondicional para a realização desta Dissertação.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo suporte financeiro na implantação da Rede Agrometeorológica do Noroeste Paulista (Processo 2.009/52.467-4).

RESUMO

A Cultura da cana de açúcar tem grande importância econômica e é uma das principais culturas na região Noroeste Paulista. Para máximas produtividades e eficiência do uso da água cabe ao produtor desta cultura compreender a necessidade hídrica, quantificando o volume de água necessário durante o seu ciclo de desenvolvimento e, para tanto, o conhecimento da evapotranspiração da referência (ET₀) e dos coeficientes de cultura (K_c) ao longo do ciclo, os quais são fundamentais como estratégia de manejo quando a opção de controle é baseada via atmosfera. Neste trabalho o objetivo foi determinar a necessidade hídrica total e a média diária da cultura da cana-de-açúcar no Noroeste Paulista, realizar o balanço hídrico e manejo da irrigação usando um sistema de irrigação por gotejamento e estimar a relação ET_a/ET₀ usando o modelo SAFER (Simple Algorithm for Retrieving Evapotranspiration), a necessidade hídrica total variou entre 1000 mm/safra e 1600 mm/safra dependendo da duração do ciclo da cultura, a necessidade diária teve uma variação entre os 3,6 mm/dia e 4,2 mm/dia, dependente do valor da ET₀. Observou-se que o sistema de irrigação não consegue aplicar a lâmina diária necessária para a cultura, em média aos 4,1 mm/dia. O manejo de irrigação recomendado foi de um turno de rega fixo de 5 dias. No cálculo da relação ET_a/ET₀, o comportamento da curva formada pelos valores determinados mostrou coerência com as curvas encontradas na literatura, entretanto os valores encontrados foram menores do que aqueles recomendados, mas ainda assim favoráveis para o estudo da necessidade de água da cana-de-açúcar no Noroeste Paulista, devendo-se continuar com estudos que calibrem o algoritmo SAFER para obtenção de melhores resultados.

Palavras-chave: Balanço Hídrico. Evapotranspiração. Manejo da irrigação. Necessidade hídrica.

ABSTRACT

The culture of sugarcane has great economic importance and is one of the main crops in the Northwest region of São Paulo state. For maximum productivity and water use efficiency, it is the responsibility of the grower of this crop to understand the water requirement, quantifying the volume of water required during its development cycle and, therefore, knowledge of reference evapotranspiration (ETo) and crop coefficients (K_c) during the cycle which are fundamental as a management strategy when the control option is based via atmosphere. In this work the objective was to determine the daily and total daily water requirement of the sugarcane crop in Northwest of the São Paulo state, to perform the water balance and irrigation management using a drip irrigation system and estimate the ET_a/ET_0 ratio using the SAFER (Simple Algorithm for Retrieving Evapotranspiration) model, the total water requirement ranged from 1000 mm/crop to 1600 mm/crop depending on the duration of the culture cycle, the daily requirement had a variation between 3.6 mm/day and 4.2 mm/day, depending of the value of ETo . It was observed that the irrigation system can't apply the daily blade needed by the crop on average to 4.1 mm/day. The irrigation management recommended was a fixed irrigation shift of 5 days. In the calculation of the ET_a/ET_0 ratio, the behavior of the curve formed by the determined values showed coherence with the curves found in the literature, however the values found were lower than those recommended but still favorable for the study of the needed of sugarcane water in the Northwest of São Paulo state region, and it is necessary to continue studies that calibrate the SAFER algorithm to obtain better results.

Keywords: Water Balance. Evapotranspiration. Irrigation management. Water need.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento.
ETa	Evapotranspiração atual da cultura (mm dia^{-1}).
ETc	Evapotranspiração da Cultura (mm dia^{-1}).
ETo	Evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}).
FAO	Food and Agriculture Organization.
G	Fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$).
Kc	Coeficiente de cultivo.
METRIC	model (Mapping Evapotranspiration at High Resolution using Internalized Calibration).
Rn	Radiação neta na superfície do cultivo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$).
Ra	Radiação extraterrestre (mm dia^{-1}).
SAFER	Simple Algorithm for Retrieving Evapotranspiration.
T	Temperatura média do ar a 2 m de altura ($^{\circ}\text{C}$).
UNICA	União da indústria de cana-de-açúcar.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL.....	25
CAPÍTULO 1 - NECESSIDADE HÍDRICA DA CANA DE AÇÚCAR NO NOROESTE PAULISTA.....	28
1.1 INTRODUÇÃO.....	30
1.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	31
1.2.1 Área comercial Andradina.....	31
1.2.2 Área comercial Rubineia.....	32
1.2.3 Estimativa da necessidade hídrica.....	33
1.2.3.1 Equação Penman-Monteith.....	33
1.2.3.1 Coeficiente de cultivo (Kc).....	34
1.2.4 Cálculo dos graus dias acumulados.....	35
1.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	36
1.4 CONCLUSÃO.....	47
REFERÊNCIAS.....	47
CAPÍTULO 2- BALANÇO HÍDRICO E ESTIMATIVA DOS COEFICIENTES DE CULTIVO NA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR.....	51
2.1 INTRODUÇÃO.....	53
2.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	54
2.2.1 Manejo da Irrigação realizado durante o ciclo produtivo da safra (2016 - 2017).....	54
2.2.2 Manejo de irrigação recomendado para otimizar o sistema.....	56

2.2.3	Determinação dos coeficientes de cultivo (ET _a /ET ₀) e a Evapotranspiração atual da cultura (ET _a) com o uso do modelo SAFER.....	57
2.2.3.1	Aquisição da base de dados.....	59
2.2.3.2	Processamento.....	59
2.3	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	60
2.3.1	Manejo da Irrigação realizado durante o ciclo produtivo da safra (2016 - 2017).....	60
2.3.2	Manejo de irrigação recomendado para otimizar o sistema.....	64
2.3.3	Determinação dos coeficientes de cultivo (ET _a /ET ₀) e a Evapotranspiração atual da cultura (ET _a) com o uso do modelo SAFER.....	67
2.4	CONCLUSÃO.....	71
	REFERÊNCIAS.....	71
	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	76
	REFERÊNCIAS.....	77
	Anexos.....	78

INTRODUÇÃO GERAL

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) é uma planta pertencente à família poaceae originada do sudeste asiático, onde sua existência era tida como um estado de planta silvestre e ornamental, sendo utilizada primeiramente na Índia como planta produtora de açúcar. Segundo Delgado e Cesar (1997) os persas parecem ter sido os primeiros a desenvolverem as técnicas de produção de açúcar na forma cristalizada. No Brasil foi introduzida na época do descobrimento pelos portugueses espalhando-se nos solos férteis com a ajuda do clima tropical. Desde então, as indústrias cuja matéria-prima é a cana-de-açúcar se multiplicaram e se modernizaram, levando o país à hegemonia mundial na produção de açúcar e álcool (CHAVES et al., 2003).

A cana-de-açúcar é uma das culturas de grande importância socioeconômica no Brasil, seus principais derivados são o açúcar e o álcool que são imprescindíveis ao mercado mundial (DANTAS NETO et al., 2006) esta planta é cultivada, principalmente, em clima tropical onde se alternam as estações secas e úmidas. O Brasil é o primeiro produtor mundial de cana-de-açúcar, produz mais de 657,1 milhões de toneladas (safra 2016/2017), também o maior produtor de açúcar com mais de 38,7 milhões de toneladas produzidas e aproximadamente 24 milhões de toneladas exportadas no ciclo 2016/2017 (CONAB, 2017), responsável por 20% da produção mundial e 40% das exportações mundiais. É o segundo maior produtor mundial de etanol, safra 2016/2017, atingindo um volume de mais de 27,25 bilhões de litros (ÚNICA, 2017). Para o presente ano, espera-se um decrescimento de -1,5% na produção brasileira de cana-de-açúcar na safra 2017/2018, em relação à safra anterior, com colheita estimada em 647,6 milhões de toneladas (CONAB, 2017).

Na safra 2016/2017 o Estado de São Paulo foi o maior produtor nacional de cana de açúcar com uma produção de 365,990 milhões de toneladas, respondendo por mais de 43,8% da produção total do país, e uma produtividade meia de 77,27 t ha⁻¹, seguido pelo estado de Goiás com uma produção de 67,630 milhões de toneladas com produtividade meia de 74,92127 t ha⁻¹ e Minas Gerais com uma 63,516 milhões de toneladas e 78,026 27 t ha⁻¹ respetivamente, entretanto, em algumas regiões do país, a ocorrência de veranicos e a má distribuição das chuvas causam redução na produtividade dos canaviais (CONAB, 2017) .

A cana-de-açúcar apresenta sistema fotossintético C4, e onde há temperaturas maiores de (30 a 40°C) obtém-se um alto metabolismo fotossintético (TAIZ E ZEIGER, 2004). Vale destacar que o bom desenvolvimento fisiológico da planta também vai depender de fatores do clima, das práticas culturais e da disponibilidade de agua no solo durante todo seu ciclo de crescimento. Esta é uma cultura que se adapta a climas tropicais e subtropicais produzindo uma considerável quantidade de biomassa (TEJERA et al., 2007), quando a quantidade de agua necessária é suprida adequadamente. Sabendo-se que a cana-de-açúcar exige um grande volume de água durante seu ciclo de produção (WIEDENFELD, 2004), Portanto, é necessário estimar mais precisamente a necessidade de água da cana-de-açúcar.

A necessidade hídrica total da cana-de-açúcar para cumprir um ciclo produtivo está entre os 1500 e 2500 mm/safra, a temperatura basal para essa cultura fica em torno de 20°C e a faixa ótima, na qual a cultura apresenta crescimento máximo, situasse entre 22 e 30°C. Acima de 38°C a planta entra em estresse agudo e o crescimento torna-se impossível, podendo até morrer Doorenbos e Kassan (1979).

Período de plantio, cultivares e técnicas agrícolas são fatores inerentes as condições ambientais que influenciaria na necessidade hídrica da cana-de-açúcar (SILVA et al., 2014), levando em conta todos estes fatores, este es um cultivo que tende de apresentar grande variações entre as regiões de produção (DOORENBOS e KASSAM, 1979; FARIA et al., 2008; INMAN-BAMBER e SMITH, 2005; PACHECO et al., 1983). Apesar do grande número de informações da necessidade hídrica da cana-de-açúcar em vários lugares do mundo pouco se conhece, ainda, sobre a lâmina de água total que deve ser aplicada na cultura em condições irrigadas para o noroeste paulista, região que apresenta a maior taxa de evapotranspiração do estado de São Paulo (HERNANDEZ et al., 2003).

A maioria dos estudos concentram-se na escala de campo ou na parametrização do uso de água específica do local em relação à idade ou ao crescimento da cultura (ANDERSON et al., 2015). A tecnologia de sensoriamento remoto pode fornecer uma ferramenta eficaz para estimar o consumo de agua pela cultura em escala regional, Teixeira et al. (2016) realizou Um trabalho relativamente onde feito a avaliação do crescimento da cana-de-açúcar e uso de água usando dados de satélite de sensoriamento remoto na região do Noroeste Paulista.

Este trabalho teve por objetivo determinar as necessidades hídricas da cultura da cana-de-açúcar, realizar simulações do balanço hídrico com dados reais para

verificar como o manejo da irrigação, e avaliar a capacidade de operação do sistema para chegar à melhor recomendação do manejo da irrigação. Assim também foi determinada a relação ET_a/ET₀ nas diferentes fases fenológicas com a aplicação do modelo SAFER por meio do sensoriamento remoto e comparados estes valores com os propostos na literatura, principalmente com os descritos no Boletim FAO 56 (ALLEN et al., 1998).

CAPÍTULO 1

NECESSIDADE HÍDRICA DA CANA-DE-AÇÚCAR NO NOROESTE PAULISTA¹

Alberto Mario Arroyo Avilez², Fernando Braz Tangerino Hernandez³.

¹ Apoio financeiro da FAPESP Processo 2.009/52.467-4

² Mestrando no Programa de Pós-Graduação em Irrigação e Drenagem, UNESP Botucatu. Email: betomario1494@gmail.com

³ Professor Titular da UNESP Ilha Solteira. Email: fbthtang@agr.feis.unesp.br

RESUMO

O conhecimento da necessidade hídrica das culturas é fundamental na agricultura, pois desta forma pode-se estabelecer a quantidade de água a ser aplicada às culturas irrigadas, dimensionar sistemas de irrigação e realizar o manejo racional da água. Com isso, o objetivo deste trabalho foi determinar a evapotranspiração máxima da cultura da cana-de-açúcar por meio da estimativa da evapotranspiração de referência e coeficientes de cultivo e assim obter a necessidade hídrica total por safra da cana-de-açúcar no Noroeste Paulista. A estimativa da necessidade hídrica na região foi realizada em duas fazendas comerciais chamadas de área Andradina e área Rubineia. Na primeira área comercial se estimou valores totais de evapotranspiração da cultura (ETc) para as safras 2013/2014, 2014/2015, 2015/2016 e 2016/2017, as duas primeiras safras obtiveram valores de ETc total próximos aos 1300 mm/safra e médios aos 3,7 mm/dia com uma variação entre talhões, a terceira e quarta safra foram valores totais obtidos entre 1400 mm/safra e 1600 mm/safra e médios entre 4,0 e 4,1 mm/dia, variando dependendo do talhão para o qual foi determinado. Na área Rubineia as estimativas foram para as safras, 2015/2016 e 2016/2017 mostrando uma variação na necessidade hídrica média entre as duas safras de aproximadamente 300 mm, onde também apresentaram variação entre talhões da área, a primeira safra teve valores de ETc total entre 1200 mm/safra e 1600 mm/safra e para a segunda entre 1000 mm/safra e 1200 mm/safra, sendo a variação destes valores influenciados principalmente pelo o número de dias do ciclo da cultura.

Palavras – chave: Dados meteorológicos. Evapotranspiração. Coeficiente de cultivo.

ABSTRACT

The knowledge of the water requirement of crops is fundamental in agriculture, because this way one can establish the amount of water to be applied to irrigated crops, size irrigation systems and make the management to be applied. The objective of this work was to determine the maximum evapotranspiration of the sugarcane crop by estimating the reference evapotranspiration and crop coefficients and thus to obtain the total water requirement per sugarcane crop in the Northwest region of the states of São Paulo. The estimation of the water requirement in the region was carried out in two commercial farms called the Andradina area and the Rubineia area. In the first commercial area, total crop Evapotranspiration (ETc) values were estimated for the 2013/2014, 2014/2015, 2015/2016 and 2016/2017 seasons, the first two crops obtained total ETc values close to 1300 mm/crop and average values at 3.7 mm/day with a slight variation between stands, the third and fourth crops were total values obtained between 1400 mm/crop and 1600 mm/crop and mean values between 4.0 and 4.1 mm/day, varying depending of the plot for which it was determined. In the Rubineia area the estimates were for the crops, 2015/2016 and 2016/2017 showing little variation in the water requirement between the two crops, but rather varying between fields, the first crop had total ETc values between 1200 mm/crop and 1600 mm/crop and for the second between 1000 mm/crop and 1200 mm/crop influencing the variation of these values mainly the number of days of the crop cycle.

Keywords: Meteorological data. Evapotranspiration. Coefficient of crop.

1.1 INTRODUÇÃO

No Brasil, o cultivo da cana-de-açúcar tem aumentado nos últimos anos junto com a expansão do setor sucroalcooleiro, sendo uma cultura de alto valor econômico e onde seus principais derivados são o açúcar (alimento) e o álcool (hidratado e anidro), imprescindíveis ao mercado mundial, outros produtos originados da cultura são reutilizados como, o bagaço que é aproveitado pelas usinas para a geração de energia, a vinhaça utilizada para fertilizar os solos mesmo em campos onde é cultivada a cultura (SOUZA et al., 1999).

Um fator significativo para o crescimento de uma planta é a disponibilidade de água e nutrientes no solo. Para o uso da água pela cana-de-açúcar, é fundamental identificar a necessidade hídrica durante todo o ciclo produtivo da cultura e desta forma obter máximas produtividades (WIEDENFELD e ENCISO, 2008).

A estimativa da necessidade hídrica das plantas é importante em diversas áreas da agricultura, tais como, estudos da demanda e do manejo da irrigação, saneamento agrícola, estimativa da produção e estudos hidrológicos em geral, segundo Doorenbos e Kassam (1979) os valores da necessidade hídrica da cana-de-açúcar varia entre 1500 e 2500 mm. Nas principais regiões produtoras de cana-de-açúcar do país o consumo hídrico diário da cultura tem uma variação dependendo da variedade, do estágio de desenvolvimento e da demanda da taxa evapotranspirativa, e também varia em função dos meses e da região, sendo esses valores entre 2,0 e 6,0 mm/dia (BERNARDO, 2006).

A cultura da cana de açúcar possui quatro fases de desenvolvimento, (i) brotação, (ii) perfilhamento e (iii) crescimento vegetativo, e maturação. A necessidade hídrica terá uma variação em função das fases vegetativas, as três primeiras fases vegetativas são consideradas como as fases onde a cultura é bastante sensível à deficiência hídrica, sendo a terceira fase onde a cultura tem uma maior exigência hídrica. Também, o ideal para a cultura nestas três fases segundo Almeida et al. (2008) são temperaturas do ar entre os 25°C e 33°C, para que a cultura se mantenha dentro da amplitude térmica ideal. A maturação é a quarta fase vegetativa da cultura e segundo Ramesh e Mahadevaswamy (2000) neste período ocorre o maior acúmulo de sacarose nos colmos. Para esta fase, o ideal é que a água presente no solo seja menor que nas fases anteriores, sendo que o processo

de maturação pode-se acelerar evitando a irrigação, induzindo estresse hídrico (SMITH e INMAN-BAMBER, 2005).

A evapotranspiração da cultura (ETc) está diretamente relacionada com estes estudos e é definida como a quantidade de água consumida por um determinado cultivo. Segundo Allen et al. (2006), a ETc é a combinação da evaporação, que provem do solo mais a transpiração, que está relacionada com a planta, portanto a estimativa correta destes duas variáveis proporcionará valores do total da água que a planta consome durante seu ciclo produtivo.

A evapotranspiração pode ser estimada por meio de medidas diretas como é no caso dos lisímetros baseado no método do balanço de agua no solo e também por meio de modelos que usem dados meteorológicos, usando métodos empíricos que estimam a evapotranspiração com base na resultante da interação de variáveis meteorológicas que condicionam a demanda atmosférica (PIVETTA et al., 2010).

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi determinar a evapotranspiração máxima da cultura da cana-de-açúcar por meio da estimativa da evapotranspiração de referência e coeficientes de cultivo, para assim obter a necessidade hídrica total por safra da cultura no Noroeste Paulista.

1.2 MATERIAL E MÉTODOS

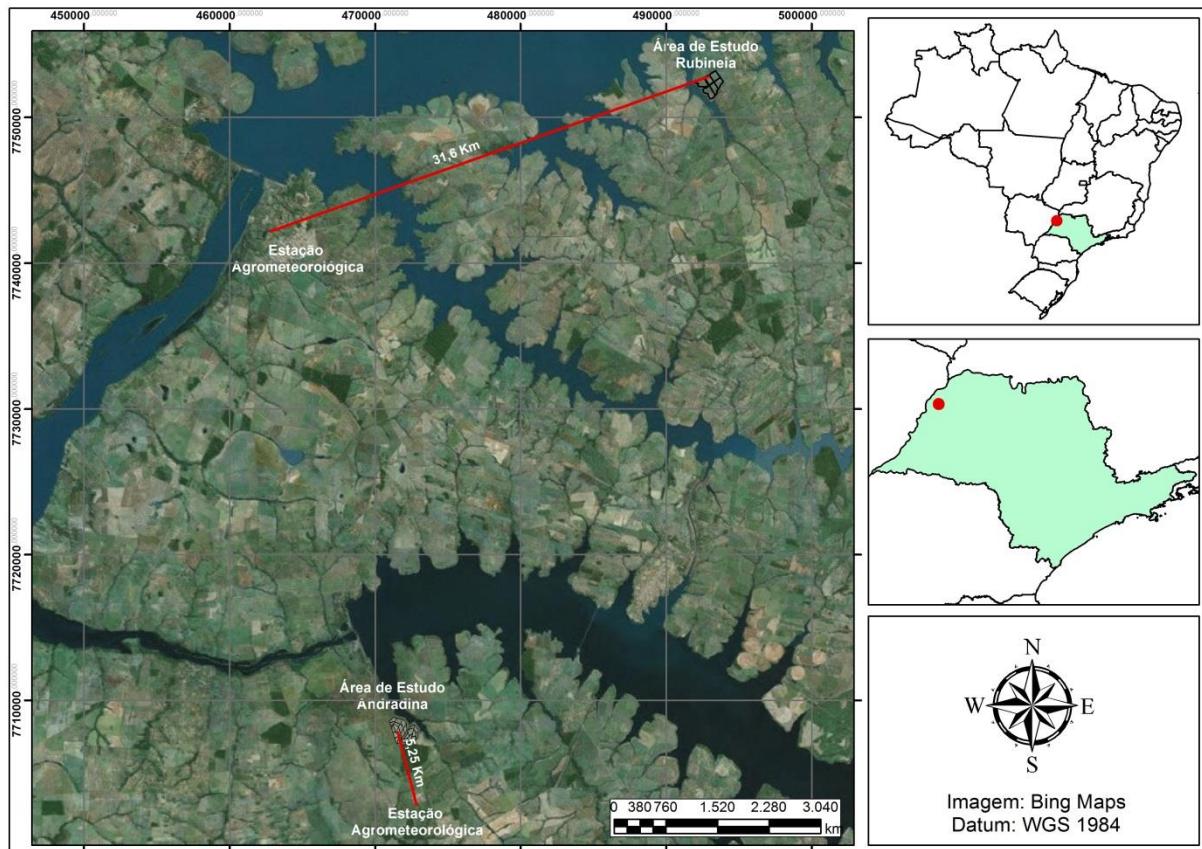
1.2.1 Área comercial Andradina

A estação agrometeorológica para a aquisição dos dados de evapotranspiração de referência(ETo) encontra-se a 5,25 Km da área de estudo (Latitude 20° 43' 43,6" S, Longitude 51° 16' 30,3" W, 360 m de altitude) (Figura 1), a área de estudo foi dividida em dez talhões e estes divididos por setores pela fazenda comercial com suas respetivas variedades e uma média de 20 ha, os talhões 1.1 a 1.4, 2.1 a 2.5, 4.1 a 4.4 e 5.1 a 5.4 foram plantado com a variedade CTC 4, os 7.1 a 7.4, 8.1 a 8.3, 9.1 a 9.3 e 10.1 a 10.4 com a variedade CTC 15, o 3.1 a 3.5 variedade RB96 - 6928, e o talhão 6.1 a 6.4 com a variedade RB92 - 579. Foram realizados os cálculos para a estimativa da ETc total por safra de produção, para quatro safras da cultura, sendo a 1^a safra entre os anos (2013/2014), 2^a safra (2014/2015), 3^a safra (2015/2016) e 4^a safra (2016/2017).

1.2.2 Área comercial Rubineia

Para a área no município de Rubineia, os dados de ETo foram obtidos através da Rede Agrometeorológica do Noroeste Paulista (<http://clima.feis.unesp.br>) operada pela ÁREA DE HIDRÁULICA E IRRIGAÇÃO DA UNESP ILHA SOLTEIRA, na estação localizada no município de Ilha Solteira (Latitude 20.0° 25.0' 24.4" S, Longitude 51.0° 21.0' 13.1" W, 337 m de altitude) (Figura 1). A área de estudo foi dividida em seis talhões pela fazenda comercial (101, 102, 103, 104, 105, 111). Se realizou o cálculo da ETc para duas safras produtivas da cana de açúcar, 1^a safra, após o plantio (2015/2016) e 2^a safra (2016/2017).

Figura 1 - Localização das áreas de estudo e distância até as estações agrometeorológicas em Andradina e em Rubineia.



1.2.3 Estimativa da necessidade hídrica

Para a estimativa da necessidade hídrica determinou-se através do cálculo da evapotranspiração da cultura (ETc) por meio da Equação 1, utilizando-se dados de evapotranspiração de referência estimadas diariamente a partir do cálculo da ETo por Penman-Monteith parametrizado pela FAO (ALLEN et al., 1998) fornecidas pelas estações agrometeorológicas descritas para cada área. Os valores dos coeficientes de cultivo (Kc) foram adaptados para a região, estes utilizados pelas fazendas comerciais onde foram realizados os estudos, seguindo o conceito dos coeficientes de cultivo simples (Kc single) proposto por (DOORENBOS e PRUITT, 1977). A curva do Kc apresenta como uma série de quatro segmentos lineares (Figura 2) que representam o desenvolvimento inicial, médio e períodos de crescimento da safra tardia, que também foram sugeridos por Allen et al. (1998).

$$ETc = ETo * Kc \quad (1)$$

Em que:

ETc = Evapotranspiração da Cultura (mm/dia).

ETo = Evapotranspiração de referência (mm/dia).

Kc = Coeficiente de Cultura (single).

1.2.3.1 Equação Penman-Monteith

A equação de Penman-Monteith (Equação 2) para a estimativa da ETo tem como base dados agrometeorológicos. As variáveis utilizadas foram radiação global, fluxo de calor no solo, temperatura media do ar, velocidade do vento entre outras. A equação de Penman-Monteith representa uma importância na estimativa da evapotranspiração de referência uma vez que esta determina a evapotranspiração de uma superfície hipotética de referência, proporcionando um valor padrão pode-se comparar a evapotranspiração em diversos períodos do ano ou em outras regiões, assim como também se poderia relacionar com a evapotranspiração de outros cultivos (ALLEN et al., 1998).

$$ET_0 = \frac{0,408 \Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34 U_2)} \quad (2)$$

Em que:

ET_0 = Evapotranspiração de referência (mm dia⁻¹).

R_n = Radiação neta na superfície do cultivo (MJ m⁻² dia⁻¹).

G = Fluxo de calor no solo (MJ m⁻² dia⁻¹).

T = Temperatura média do ar a 2 m de altura (°C).

U_2 = Velocidade do vento a 2 m de altura (m s⁻¹).

e_s = Pressão do vapor de saturação (kPa).

e_a = Pressão real do vapor (kPa).

$e_s - e_a$ = Déficit da pressão de vapor (kPa).

Δ = Pendente da curva de pressão de vapor (kPa °C⁻¹).

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

1.2.3.2 Coeficiente de cultivo (Kc)

Os valores de Kc utilizados na estimativa da ETc foram adaptadas para cana primeira safra e cana soca com variações diferentes nos valores da primeira fase da cultura (Brotação e estabelecimento da cultura) para a região, seguindo o modelo dos coeficientes de cultivo (Kc) recomendados por Allen et al. (1998).

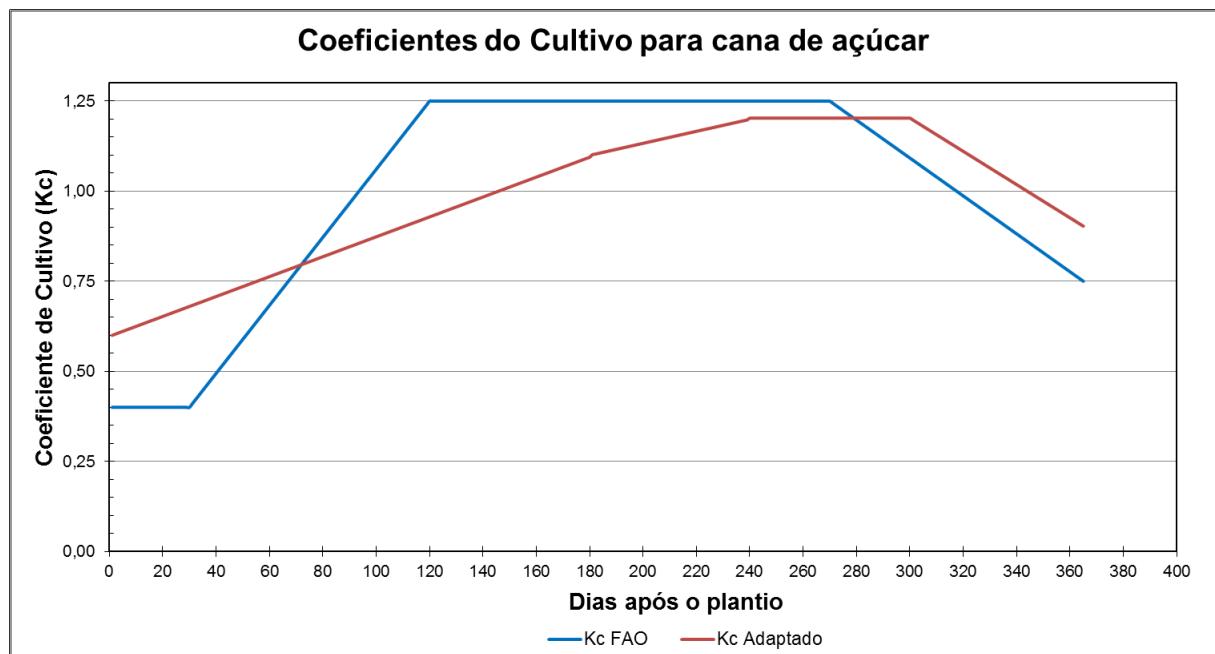
Usou-se o coeficiente único (Kc Single) considerando-se que esta metodologia incorpora as características do cultivo e os efeitos médios da evaporação no solo, sendo importantes para a planificação da irrigação e realização do manejo auxiliando na determinação dos calendários básicos da irrigação e na maioria dos estudos de balanço hídrico (ALLEN et al., 1998).

A primeira adaptação dos valores da duração das fases do crescimento da cultura representa o ciclo produtivo da cana de açúcar após o dia de plantio (primeiro corte), dividido em quatro segmentos lineares segundo proposto na literatura por (DOORENBOS e PRUITT, 1977), variando o primeiro segmento de 0,3 até 1,1 numa duração de 180 dias após plantio, este segmento compreende a fase I (Brotação e estabelecimento da cultura) e parte da fase II (Estabelecimento e perfilhamento), o segundo segmento varia de 1,1 até 1,2 numa duração de 60 dias,

compreendendo o final da fase II e o começo da fase III (Crescimento máximo) que termina no final do terceiro segmento da curva que se mantém no valor máximo de Kc de 1,2 com uma duração de 60 dias e assim fechando nos 300 dias após o plantio da cultura. O quarto segmento da curva compreende a fase de maturação e é representado por valores decrescentes variando de 1,2 até 0,9 durante 65 dias, desta forma o ciclo da cultura completaria os 365 dias.

Uma segunda adaptação foi utilizada para os valores usados na duração das fases de crescimento da cultura quando se estimou a ETc após o primeiro corte (cana soca), esta adaptação variou somente no primeiro segmento com respeito a descrita anteriormente. Utilizando-se valores que variaram entre 0,6 até 1,2 numa duração de 180 dias, os outros segmentos compreendem números de dias e representam as fases de desenvolvimento igual do que os adaptados.

Figura 2 - Coeficientes de cultivo para cana-de-açúcar sugerida por Allen et al. (1998) e adaptados para a região do Noroeste Paulista.



1.2.4 Cálculo dos graus dias acumulados

Foi realizado o cálculo dos graus dias acumulados durante a safra de produção para a cultura da cana-de-açúcar, usando a equação 2, considerando a temperatura basal de 18 °C, de acordo com Doorenbos e Kassan (1979), outros estudos também

têm fixado a temperatura basal da cana-de-açúcar entre 8 e 18 °C, e a temperatura ótima entre 30 e 35 °C (EBRAHIM et al., 1998; VAN DILLEWIJN, 1952; INMAN-BAMBER, 1994), na qual a cultura apresenta crescimento máximo.

$$GD = \sum_{i=1}^n (T_m - T_b) \quad (2)$$

Em que:

T_m = Temperatura média diária do ar, (°C).

T_b = Temperatura base da cultura, (°C).

1.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No primeiro ano da cultura (2013/2014) para a área Andradina, a cana-de-açúcar apresentou necessidade hídrica, estimada com Kc para primeira safra, de em média 1304 mm/safra (Tabela 1), , valores acumulados menores do que os descritos por Doorenbos e Kassam (1979) que relataram que a necessidade hídrica da cana-de-açúcar é de 1500 a 2500 para todo o ciclo vegetativo da cultura, sendo considerada assim como a maioria das gramíneas, uma cultura que apresenta elevada eficiência na utilização e resgate de CO₂ da atmosfera, e que se adaptada a condições de alta intensidade luminosa e altas temperaturas, aumentando com isto o consumo de água (SEGATO et al., 2006; FAO, 2014). Corroborando com Wiedenfeld (2004), que constatou que a cana-de-açúcar é considerada uma cultura que para cumprir seu ciclo total de produção demanda um grande volume de água. Ainda na Tabela 1, o talhão 3.1 a 3.5 a exceção dos outros talhões, mostrou uma necessidade hídrica de 916 mm/safra, esta diferença se deve ao fato do ciclo da cultura ser compreendido em um número de dias menores com relação aos demais talhões. Esta redução do ciclo da cultura foi realizada para fins de manejos operacionais na colheita dos talhões. Contudo, o valor acumulado menor com relação aos outros talhões, pode ser devido a um ciclo menor, assim, observa-se que a necessidade hídrica média diária da cultura não tem variação entre os talhões, obtendo-se uma estimativa média de 3,7 mm/dia.

Tabela 1- Necessidade hídrica da cana-de-açúcar para o primeiro ciclo produtivo em área comercial no município de Andradina.

Talhões	Início do ciclo	Safra 2013 - 2014					
		1ro. Ciclo	ETo Total	ETo Media	ETc	ETc Media	ΣGraus Dias °
	Data	dias	mm/safra	mm/dia	mm/safra	mm/dia	
2.1 a 2.5	19/10/2013	371	1592	4,3	1397	3,8	2806
3.1 a 3.5	15/10/2013	245	1060	4,3	916	3,7	1939
7.1 a 7.4	24/08/2013	355	1489	4,2	1315	3,7	2480
8.1 a 8.3	22/08/2013	364	1529	4,2	1352	3,7	2544
9.1 a 9.3	14/08/2013	334	1432	4,3	1265	3,8	2391
10.1 a 10.4	02/09/2013	352	1470	4,2	1293	3,7	2474
1.1 a 1.4	10/10/2013	344	1456	4,2	1273	3,7	2560
4.1 a 4.4	14/10/2013	338	1428	4,2	1244	3,7	2514
5.1 a 5.4	22/09/2013	359	1514	4,2	1335	3,7	2614
6.1 a 6.4	26/09/2013	356	1501	4,2	1322	3,7	2605
Desvio Padrão	-	-	144	0	133	0	224
Média	-	-	1479	4,2	1304	3,7	2529

Na área Rubinéia o primeiro ciclo produtivo da cultura foi durante os anos 2015/2016, os valores referentes à necessidade hídrica total durante o ciclo (Tabela 2) foram em média de 1400 mm/safra entre os talhões, também abaixo dos descritos por Doorenbos e Kassam (1979). A variação dos valores da necessidade hídrica total refletiu-se, da mesma forma, nos valores de ETc média diária que variaram entre os talhões. Os talhões 101, 102 e 111 tiveram uma média de 3,3 mm/dia, valores 8,3% abaixo quando comparados aos outros três talhões que foram de 3,6 mm/dia, esta diferença aconteceu devido ao número de dias que a cultura esteve em campo, sendo os maiores valores para os talhões que tiveram um ciclo mais longo.

Também cabe dizer que os valores médios de ETc no primeiro ciclo dependeram principalmente dos coeficientes de cultura (Kc), igual ao demonstrado na Tabela 1 para a área Andradina, uma vez que, os coeficientes de cultura na primeira fase começam com 0,3 até 1,1 e representaram o segmento mais longo dos coeficientes (180 dias), a estimativa da ETc durante estes 180 dias seria menor do que estimada com os coeficientes da cultura sugeridos por (DOORENBOS e PRUITT, 1977) que inicia no valor de 0,4 e aos 180 dias se encontraria em 1,25 (Figura 2), e assim influenciou no final para o cálculo da necessidade hídrica total da cultura.

Tabela 2 - Necessidade hídrica da cana-de-açúcar para o primeiro ciclo produtivo em área comercial no município de Rubineia.

Talhões	Início do ciclo	1o. Ciclo	Safra 2015 - 2016				
			ETo total	ETo Media	ETc	ETc Media	ΣGraus Dias °
	Data	dias	mm/safra	mm/dia	mm/safra	mm/dia	
101	02/11/2015	360	1332	3,7	1179	3,3	2484
102	09/10/2015	384	1436	3,7	1252	3,3	2703
103	04/09/2015	417	1573	3,8	1495	3,6	2943
104	05/09/2015	417	1571	3,8	1494	3,6	2940
105	02/08/2015	450	1723	3,8	1641	3,6	3176
111	28/09/2015	393	1473	3,7	1306	3,3	2747
Desvio Padrão	-	-	135	0	176	0	239
Média	-	-	1522	3,8	1400	3,5	2843

Na estimativa da evapotranspiração de referência média para o primeiro ciclo da cultura, existiu uma variação entre os talhões das duas áreas de estudo, estes valores foram de 4,2 e 3,8 mm/dia para a área Andradina e Rubineia, respectivamente (Tabela 1 e Tabela 2). Pode-se considerar que a diferença destes valores de ETo entre as áreas ocorreu por os ciclos ter acontecido em anos diferentes, mas vale a comparação dos valores de ETc entre áreas, por ter sido o primeiro ciclo das culturas em cada área, portanto para a estimativa da ETc usaram-se valores de Kc iguais (primeira safra da cultura), adaptados para a região a partir de Allen et al. (1998), assim observa-se que a diferença na ETc média entre cada área foi influenciada diretamente pelos valores de ETo.

Observa-se também que há uma variação dos valores de ETc entre os talhões para a área Rubineia (Tabela 2) dependendo diretamente da variação dos valores da ETo, assim como foi observada esta variação para a área Andradina (Tabela 1). Contudo de acordo com Chaves et al. (2015) a variação da ETc para a mesma cultura varia entre duas áreas em locais diferentes e numa área durante o ciclo da cultura, já que esta depende da variação da ETo, por tanto, a ETo varia dependendo das variáveis meteorológicas de cada local, assim como também numa mesma área com relação as variáveis meteorológicas diárias.

Na estimativa da necessidade hídrica da cana após a primeira safra representados na Tabela 3, os valores foram entorno de uns 1334 mm/safra, com exceção do talhão 2.1 a 2.5 com 1164 mm/safra, sendo 12,7% menor, o decréscimo deste valor foi basicamente devido ao número de dias do ciclo, que foram menores com relação aos outros, também observou-se que os valores médios de ETo foram menores com relação ao ciclo anterior na mesma área, e desta forma com a

diminuição da ETo o resultado da ETc teve valores semelhantes aos da Tabela 1, ainda após ter usado valores de Kc adaptados para a região maiores do que aqueles usados para a estimativa da necessidade hídrica do primeiro ciclo. Sendo portanto, a diminuição dos valores de ETc total influenciados diretamente pela ETo, uma vez que Silva et al. (2012) encontraram para cana-de-açúcar, usando valores de Kc semelhantes aos usados neste trabalho uma necessidade hídrica total de 1710 mm/safra, a partir do cálculo da ETo que totalizou 1743 mm/safra. E assim observa-se que a ETc acumulada durante o ciclo da cana de açúcar é inferior se a demanda atmosférica, em termos de evapotranspiração de referência (ETo) também for inferior nesse mesmo local.

Tabela 3 - Necessidade hídrica da cana de açúcar para o segundo ciclo produtivo em área comercial no município de Andradina.

Talhões	Início do ciclo	Safra 2014 - 2015					
		Data	2o. Ciclo dias	ETo total mm/safra	ETo Media mm/dia	ETc mm/safra	ETc Media mm/dia
2.1 a 2.5	25/10/2014	340	1203	3,5	1164	3,4	2382
3.1 a 3.5	17/06/2014	371	1407	3,8	1394	3,7	2692
7.1 a 7.4	14/08/2014	379	1433	3,8	1366	3,6	2777
8.1 a 8.3	21/08/2014	373	1410	3,8	1341	3,6	2744
9.1 a 9.3	14/07/2014	411	1541	3,7	1490	3,6	2909
10.1 a 10.4	20/08/2014	376	1423	3,8	1353	3,6	2768
1.1 a 1.4	19/09/2014	376	1380	3,7	1317	3,5	2694
4.1 a 4.4	17/09/2014	376	1320	3,7	1320	3,5	2700
5.1 a 5.4	16/09/2014	378	1391	3,7	1326	3,5	2714
6.1 a 6.4	17/09/2014	377	1387	3,7	1322	3,5	2708
Desvio Padrão	-	-	86	0	81	0	132
Média	-	-	1399	3,7	1334	3,6	2711

As Tabelas 4 e 5 representam a estimativa da necessidade hídrica em área comercial no município de Andradina, para os ciclos 2015 - 2016 e 2016 - 2017, respectivamente. Nos dois ciclos, os resultados da ETo e ETc média diária foram similares, valores esses de 4,1 mm/dia e 4,0 mm/dia (Tabela 4) e 4,3 e 4,1 mm/dia (Tabela 5). Estes valores estão próximos aos encontrados por Teixeira et al., (2016) que estimaram a evapotranspiração atual da cultura (ETa) para cana sequeiro para o período 2011 e 2012 por meio do sensoriamento remoto e encontraram uma média dos pixels de $4,0 \text{ mm dia}^{-1}$ na fase geral de crescimento máximo da cultura, e uma ETa média de $1,5 \text{ mm dia}^{-1}$ na fase de brotação e estabelecimento e de maturação, totalizando valor médio da ETa de $4,0 \text{ mm dia}^{-1}$ para a fase de máxima

necessidade hídrica, contudo considerando que os valores de ET_a foram estimados para cana sequeiro que pode existir falta de água no solo por causa de estiagem das chuvas, ocorrendo a redução da taxa de evapotranspiração, apresentando assim, valores de ET_c máxima a baixo dos descritos por Allen et al.,(1998).

No ciclo da safra 20125 - 2016 a necessidade hídrica total da cultura também variou em 16,5% com relação à duração do ciclo, sendo de 1372 mm/safra em 343 dias até 1644 mm/safra em 403 dias (Tabela 4). Ressaltando que não existindo a diferença entre os números de dias para a cultura cumprir o ciclo produtivo entre os talhões e sim uma diferença entre datas de corte da safra anterior, a variação da ET_c para a presente safra entre talhões estaria sendo influenciada pela data de corte, uma vez que Ascoli et al. (2017) encontraram em trabalho realizado na região do Noroeste Paulista, exigências maiores na necessidade hídrica da cana durante o ciclo da cultura quando a colheita é feita nos meses de abril e maio e menores quando a colheita ocorre nos meses de julho e agosto.

Tabela 4 - Necessidade hídrica da cana de açúcar para o terceiro ciclo produtivo em área comercial no município de Andradina.

Talhões	Início do ciclo	Safra 2015 - 2016					
		3o. Ciclo	ETo total	ETo Media	ETc	ETc Media	ΣGraus Dias °
	Data	dias	mm/safra	mm/dia	mm/safra	mm/dia	
2.1 a 2.5	30/09/2015	402	1686	4,2	1641	4,1	2772
3.1 a 3.5	23/06/2015	371	1444	3,9	1464	3,8	2654
7.1 a 7.4	28/08/2015	346	1400	4,0	1384	4,0	2529
8.1 a 8.3	29/08/2015	345	1396	4,0	1380	4,0	2526
9.1 a 9.3	29/08/2015	345	1396	4,0	1380	4,0	2526
10.1 a 10.4	31/08/2015	343	1388	4,0	1372	4,0	2513
1.1 a 1.4	30/09/2015	402	1686	4,2	1641	4,1	2772
4.1 a 4.4	28/09/2015	353	1434	4,1	1413	4,0	2447
5.1 a 5.4	29/09/2015	352	1432	4,1	1411	4,0	2441
6.1 a 6.4	29/09/2015	403	1689	4,2	1644	4,1	2780
Desvio Padrão	-	-	134	0	119	0	136
Média	-	-	1433	4,1	1412	4,0	2527

Para a safra 2016 - 2017 (Tabela 5) a variação foi de 1361 mm/safra em 330 dias até 1610 mm/safra em 380 dias na duração da safra, uma diferença do 15,5%. Comparando estes valores com os estimados na primeira safra, nota-se que a ETo teve valores semelhantes, mas a ET_c aumentou, certamente isto aconteceu por ter sido estimada a ET_c com valores do K_c adaptados para cana soca que começou seu ciclo produtivo com valor de 0,6. Corroborando com Silva et al. (2012), que em

estudos com o objetivo de determinar os coeficientes de cultivo (K_c) para a cana soca obtiveram resultados entre 0,65 e 1,1 durante o começo do ciclo, até chegar no crescimento máximo e assim obtendo uma ET_c total de 1743 mm.

Para a variação entre os talhões no mesmo ciclo, os valores de ET_c aumentaram consequentemente com o aumento dos dias para chegar no final do ciclo. Segato et al. (2006) também encontraram os maiores valores de ET_c total quando os ciclos da cultura foram mais longos, e assim observaram aumento da necessidade de água no ciclo total de produção.

Tabela 5 - Necessidade hídrica da cana-de-açúcar para o quarto ciclo produtivo em área comercial no município de Andradina.

Talhões	Início do ciclo	Safra 2016 - 2017					
		4o. Ciclo	ETo total	ETo Media	ETc	ETc Media	\sum Graus Dias
	Data	dias	mm/safra	mm/dia	mm/safra	mm/dia	°
2.1 a 2.5	05/11/2016	330	1413	4,3	1361	4,1	2285
3.1 a 3.5	28/06/2016	364	1580	4,3	1571	4,3	2424
7.1 a 7.4	08/08/2016	389	1661	4,3	1610	4,1	2479
8.1 a 8.3	08/08/2016	389	1661	4,3	1610	4,1	2479
9.1 a 9.3	08/08/2016	389	1661	4,3	1610	4,1	2479
10.1 a 10.4	08/08/2016	389	1661	4,3	1610	4,1	2479
1.1 a 1.4	05/11/2016	330	1413	4,3	1361	4,1	2261
4.1 a 4.4	15/09/2016	381	1668	4,4	1595	4,2	2594
5.1 a 5.4	15/09/2016	381	1668	4,4	1595	4,2	2594
6.1 a 6.4	05/11/2016	330	1413	4,3	1361	4,1	2261
Desvio Padrão	-	-	118	0	116	0	126
Média	-	-	1661	4,3	1595	4,1	2479

Na Tabela 6 é representado o segundo ciclo da cultura para a área de Rubineia, os valores estimados da necessidade hídrica total foi em média de 1095 mm/safra, estes foram os valores mais baixos encontrados com respeito às outras estimativas, observa-se que durante este ciclo a ETo também teve valores menores, em torno de 1146 mm/safra e o período de duração do ciclo da cultura da mesma forma, apresentaram valores menores com relação aos anteriores, aproximadamente 310 dias de duração, estas variações interferiram na estimativa da necessidade hídrica, exposto também por Azevedo et al. (1993) os quais encontraram que a redução da necessidade hídrica total para uma cultura deve-se, bem como, a redução do ciclo quando a cultura é colhida precoce. Assim a estimativa demonstrada na Tabela 6 representa um ciclo diferente ao descrito por

Doorenbos e Kassam (1979) que encontraram uma necessidade hídrica para a cana-de-açúcar de 1500 a 2500 mm quando o ciclo da cultura é de 365 dias.

Tabela 6 - Necessidade hídrica da cana de açúcar para o segundo ciclo produtivo em área comercial no município de Rubineia.

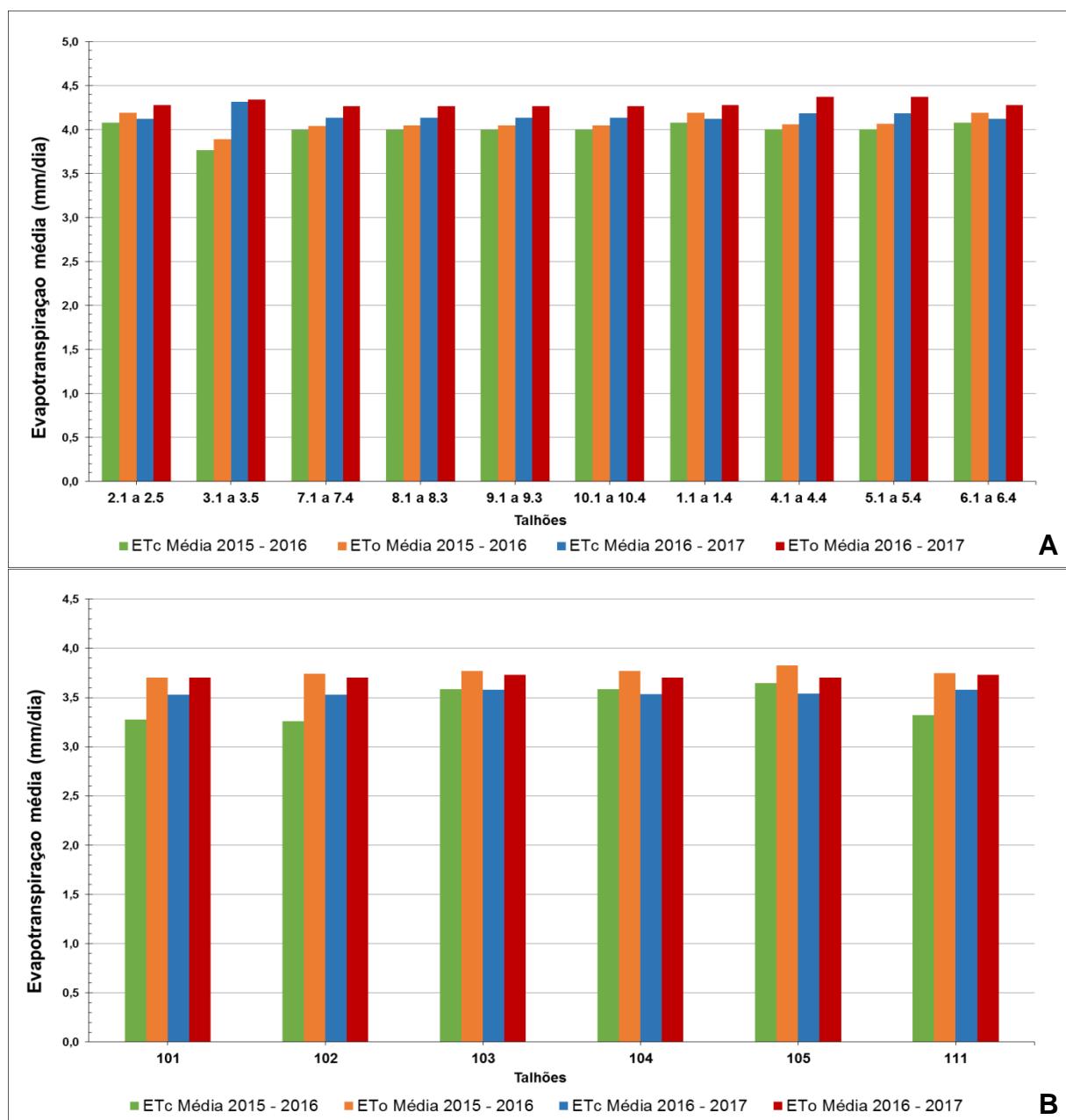
Talhões	Início do ciclo	2o. Ciclo	Safra 2016 - 2017				
			Data	dias	ETo total	ETo Media	ETc
101	27/10/2016	307	1136	3,7	1083	3,5	2155
102	27/10/2016	307	1136	3,7	1083	3,5	2155
103	25/10/2016	314	1171	3,7	1124	3,6	2192
104	26/10/2016	309	1144	3,7	1093	3,5	2151
105	25/10/2016	310	1148	3,7	1097	3,5	2159
111	25/10/2016	314	1171	3,7	1124	3,6	2192
Desvio Padrão	-	-	16	0	19	0	19
Média	-	-	1146	3,7	1095	3,5	2157

Os valores encontrados nas somatórias dos graus dias para cada safra estão representados nas Tabelas (1 até a 6), observa-se que estes valores aumentaram sempre que o ciclo da cultura foi maior, na Tabela 1 e 2 o desvio padrão foi aproximadamente 230 graus, nas Tabelas 3, 4 e 5 foi em torno de 130 graus, e para a Tabela 6 valor de 19 graus, a variação do desvio dependeu da diferença que ouve entre datas de plantio e número de dias do ciclo, nota-se que na Tabela 6 com o menor valor teve as datas do começo do ciclo quase iguais e os números de dias do ciclo também foram próximos, assim está variação acontece por serem os graus dias um resultado dependente da temperatura média do ar ocorrida a cada dia (HIGLEY et al., 1986; LEMOS FILHO et al., 1997), o conhecimento destes valores é importante para conhecer a possível quantidade de energia que a planta necessita, representada pela soma de graus térmicos acima de uma temperatura-base, para completar determinada fase fenológica (ALMEIDA et al., 2008).

Conhecer os padrões de crescimento entre variedades de cana-de-açúcar por meio da demanda térmica (usando graus dias) possibilita realizar um bom manejo da cultura, já que, se conheceriam as fases de maior desenvolvimento da cultura, e assim se coincidiria com as condições ambientais mais favoráveis para em consequentemente obter-se aumento na produtividade (CARMO et al., 2010). Isso torna-se possível, uma vez que, por meio do método dos graus dias pode-se conhecer a ocorrência de máxima área foliar ,sendo a fase da cultura onde ocorrem

os maiores valores de coeficiente de cultivo (K_c), também coincidido com o período onde a cultura precisaria de maior disponibilidade de radiação solar e água no solo, tanto no caso de plantio dependente de chuva como no irrigado (ALMEIDA et al., 2008).

Figura 3 – Evapotranspiração de referência média (ETo) e evapotranspiração da cultura média (ETc) nas áreas comerciais, Andradina (A) e Rubineia (B) durantes as safras 2015-2016 e 2016-2017.



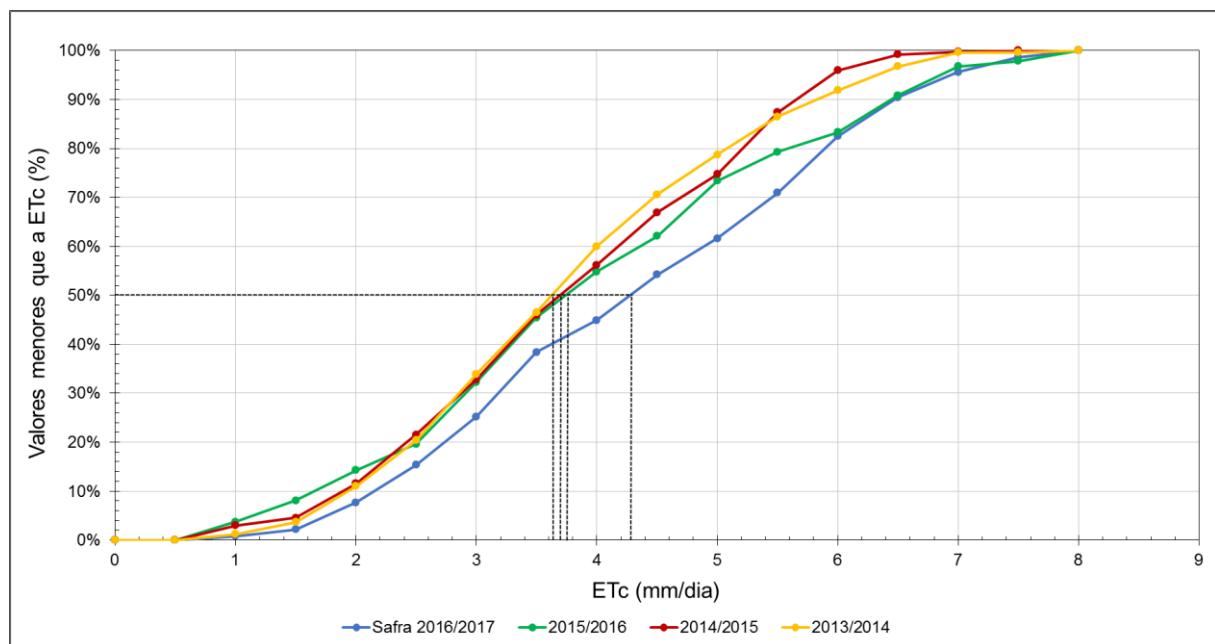
Na Figura 3 compara-se a variação da ETo e a ETc durante as safras 2015 - 2016 e 2016 - 2017 para cada talhão em suas respectivas áreas. Na Figura 3A que representam a área Andradina observa-se que a ETc e ETo apresentaram pouca variação entre os talhões para as duas safras, resultado demonstrado também nas Tabelas 1, 3, 4 e 5, onde foi calculado o desvio padrão e o resultado foi igual a zero, mesmo resultado é mostrado na Figura 3B para a área Rubineia, com o desvio padrão foi zero, bem como descrito nas Tabelas 2 e 6. Assim estes valores representam a não existência de diferença na necessidade hídrica da cana-de-açúcar entre variedades, contudo, estudos devem ser realizados para verificar estes valores, tais como a determinação da ETa para cana irrigada, dado que ao determinar a ETa da cultura sem submissão ao estresse hídrico comparada com a ETc, nos daria uma melhor resposta entre a variação desses valores entre variedades, Allen et al., (1998) considera que a ETa pode ser igual a ETc quando a cultura se encontra em boas condições de campo, ou desviar-se deste valor devido a más condições como presença de pragas e doenças, salinidade do solo, baixa fertilidade do solo e limitação ou excesso de água no solo.

Na comparação dos valores de ETo médios e ETc médios entre as áreas Andradina (Figura 3A) e Rubineia (Figura 3B) observam-se variação entre os valores, a ETc média para área Andradina foi entorno de 4,0 e 4,1 mm/dia para as safras 2015 - 2016 e 2016 - 2017 respectivamente (Tabela 4 e 5) e a área Rubineia valor médio de 3,5 mm/dia para as duas safras (Tabela 2 e 6), a diferença entre estas duas áreas esta influenciada pelos valores de ETo, de acordo com Hernandez et al. (2003), a região do Noroeste Paulista apresenta os maiores índices de evapotranspiração do Estado de São Paulo, porém entre as duas áreas observa-se valores médios de ETo menores na área Rubineia com relação a área Andradina para o mesmo período, com diferença de até 14%, esta diferença justifica a necessidade de ter estações agrometeorológicas o mais perto possível da área de estudo.

Após ter determinado a necessidade hídrica para diferentes áreas, diferentes épocas de colheita e ciclos produtivos, observou-se que a média da demanda diária de água pela cultura ficou entre os 3,5 mm/dia e 4,1 mm/dia nas duas áreas e variando segundo o número de dias do seu ciclo e os valores de Kc e ETo usados para a estimativa. Considerando também que a exigência da cultura aumenta segundo seu estágio de desenvolvimento.

A Figura 4 representa o comportamento da variação da ETc durante o ciclo produtivo nas quatro safras para a área Andradina (talhão 3.1 a 3.5), percebe-se que no caso deste talhão os valores médios de lâmina para cada safra representam 50%, ou seja que a metade dos valores da ETc diária ocorrida no ciclo são menores ao valor médio e a outra metade maior, chegando a valores maiores de até 8 mm/dia, estes valores encontram-se dentro dos determinados por Thompson e Boyce (1967) que obtiveram valores máximos de ETc igual a $6,8 \text{ mm dia}^{-1}$ para o ciclo da cana-de-açúcar medida a partir de estudos realizados com lisímetros, já Inman-Bamber e Smith (2005) citam que em estudos de medição de água no solo, encontraram valores de $7,8 \text{ mm dia}^{-1}$.

Figura 4 – Distribuição de frequência da evapotranspiração da cultura média (ETc) na área comercial do município de Andradina para os talhão 3.1 a 3.5 em todas as safras.



A representação da variação destes valores na Figura 4 é importante para conhecer o comportamento da ETc no ciclo e assim quando se fala de irrigação, estes valores auxiliam no dimensionamento de projeto ou na programação do manejo da irrigação. Assim um projeto de irrigação deve-se ser dimensionado para aplicar lâminas médias diárias que variam entre 3,7 e 4,3 mm/dia por safras para o talhão 3.1 a 3.5, sendo definida uma lâmina média de 4,1 mm/dia. Considerando a área Andradina que é dividida por dez talhões um projeto de irrigação teria que ser

dimensionado para aplicar esta lâmina média diária nos dez talhões quando não existisse ocorrências de chuvas, desta forma a cultura não estaria sujeita a estresse hídrico e alcançaria uma boa produtividade, comparando a necessidade hídrica com os valores estimados por Donzelli e Costa (2010) observa-se que para uma demanda hídrica de $3,3 \text{ mm.dia}^{-1}$ de água a produtividade pode chegar entre 100 e 120 toneladas de cana ha^{-1} (TCH) quando a cultura encontra-se sem nenhuma restrição de nutrientes e em boas condições de manejo da água no solo.

O estudo da distribuição de frequência da ETc também é útil para programar o manejo da irrigação, já que quando se trabalha com vários talhões, é necessário planejamento para que os talhões não exijam o máximo valor de necessidade hídrica ao mesmo tempo, sendo que se aconteceram necessidades hídricas diárias maiores à media do dimensionamento do projeto, simultaneamente entre os talhões, não seria possível aplicar as lâminas em todos os talhões, por isto vale o estudo também do calculo da necessidade hídrica para cada época do ano e para cada fase da cultura, e desta forma programar o inicio do ciclo da cultura para que as máximas necessidades hídricas não aconteçam ao mesmo tempo entre talhões.

Inman-Bamber (2004) cita que a máxima necessidade hídrica ocorre durante a fase de crescimento máximo e que também a deficiência hídrica durante esta fase e a de perfilhamento, reduziria a produtividade final da cultura, mas para a fase de maturação é recomendável aplicar um leve estresse hídrico e assim aumentaria a concentração de sacarose nos colmos. Ainda segundo, Bispo et al. (2017) em estudo para determinação da estimativa do consumo relativo de água para cana-de-açúcar na região do Noroeste Paulista, encontraram que a cultura apresentam menores riscos de perdas de produtividade por deficiência hídrica, ou seja, a cultura estaria exposta a um baixo risco climático, quando as fases brotação e emergência ocorreram entre os meses maio, março e abril, entretanto nas de perfilhamento e crescimento do colmo, com ocorrência nos meses de agosto e outubro mostraram-se desfavoráveis ao cultivo, sendo assim necessário utilização de irrigação.

A região do Noroeste Paulista, esta entre as recomendada para produção de cana-de-açúcar por apresentar um clima favorável para a cultura, com temperaturas médias de até 28°C (FERNANDEZ et al., 2017). Portanto consideram-se importantes estudos para a estimativa da necessidade hídrica da cultura usando métodos para a estimativa da ETc como o recomendado pela FAO 56, e assim poder realizar um bom manejo da agua na cultura, seja quando se planta cana-de-açúcar no sequeiro,

podendo-se utilizar a máxima quantidade de água proveniente da chuva e disponível no solo, nas fases que a cultura mais precisaria, assim como também quando trabalha-se com cana irrigada já que conhecendo-se a necessidade certa de água a aplicar-se na cultura e realizar o manejo da irrigação é de vital importância para garantir produtividades com os menores custos possíveis, considerando que este o setor da irrigação nos canaviais vem aumentando nos últimos anos, segundo a ANA (2017) Já contabilizam-se 1,7 milhões de hectares irrigados, apresentando aumento da produtividade média com relação à cana plantada no sequeiro.

1.4 CONCLUSÃO

A necessidade hídrica total ao longo do ciclo da cultura para a região amostrou valores para as duas áreas de estudo entre os 1095 mm/safra e 1595 mm/safra, com uma média diária de 4,0 mm/dia para área Andradina e 3,7 mm/dia para área Rubineia, estes valores de lâmina média auxiliam na escolha da lâmina de projeto para cada área.

Existe variação entre cada área, dependendo do ciclo da cultura, dos dias que levou para chegar à data de corte e dos valores de ETo.

Com o bom entendimento dos valores de coeficientes de cultivo (K_c) e da evapotranspiração de referência (ETo) que são as informações básicas para realizar um bom uso e conservação dos recursos hídricos na agricultura irrigada foi possível conhecer a necessidade hídrica da cana-de-açúcar e assim auxiliar no melhor aproveitamento da água.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. Levantamento da cana-de-açúcar irrigada na região Centro-Sul do Brasil. Brasília, DF: Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos, 2017. 31 p.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. FAO, Irrigation and Drainage Paper, 56. Rome, 1998. 300p.

ALMEIDA, A. C. S.; SOUZA, J.L.; TEODORO, I.; BARBOSA, G. V. S.; MOURA FILHO, G.; FERREIRA JÚNIOR, R. A. Desenvolvimento vegetativo e produção de

variedades de cana-de-açúcar em relação à disponibilidade hídrica e unidades térmicas. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, p. 1441-1448, set./out. 2008.

ASCOLI, A.; HERNANDEZ, F. B. T.; SENTELHAS, P. C.; TEIXEIRA, A. H. C.; AMENDOLA, E.C.; ASCOLI, R.T. Necessidade de irrigação na cultura da cana-de-açúcar em função da época de colheita. In: Inovagri International Meeting, 4; CONIRD – Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem, 26; SBS – Simpósio Brasileiro de Salinidade, 3., 2017, **Anais...** Fortaleza, 2017.

AZEVEDO, P. V. DE; RAO, T. V. R.; AMORIM NETO, M. DA S.; BEZERRA, J. R. C.; ESPÍNOLA SOBRINHO, J.; MACIEL, G. F. Necessidades hídricas da cultura do algodoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 28, n. 7, p. 863-870, Jul. 1993.

BERNARDO, S. Manejo da irrigação na cana de açúcar. Palestra no **XVI CONIRD**-Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem Goiânia-GO. 2006. 11p. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Cana_irrigada_producao_000fizvd3t102wyiv802hvm3jlwle6b8.pdf>. Acesso em: 24 de dezembro de 2017.

BISPO, R. C.; HERNANDEZ, F. B. T.; TEIXEIRA, A. H C. Balanço hídrico e estimativa do consumo relativo de água da cultura da cana-de-açúcar na região Noroeste Paulista. **Irriga**, Botucatu, Edição Especial, IRRIGA e INOVAGRI, v.1, n.1, p. 94-101, set. 2017.

CARMO, J. F. A. DO; MOURA, M. S. B. DE; SILVA, T. G. F. DA; CAMPOS, C. DE O.; BRANDÃO, E. O.; SOARES, J. M. Análise biométrica da cana-de-açúcar irrigada em relação aos graus-dia acumulados no Submédio do São Francisco. CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 16, A Amazônia e o clima global: **Anais...** SBMET, Belém, 2010.

CHAVES, S. W. P.; AZEVEDO, B. M.; MEDEIROS, J. F.; BEZERRA, F. M. L.; MORAIS, N. B. Evapotranspiração e coeficiente de cultivo da pimenteira em lisímetro de drenagem. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 36, n. 3, p. 262-267, 2005.

DONZELLI, J. L.; COSTA, V. M. Workshop - Impacto da produção de etanol no balanço hídrico nas regiões de expansão. CTC - Centro de Tecnologia Canavieira, p.1-2, 2010.

DOORENBOS, J.; KASSAN, A. H. FAO, Yield response to water. FAO. Irrigation and Drainage Paper, 33. Rome, 1979. 193p.

DOORENBOS, J.; PRUITT, J. O. Crop water requirement. FAO, Irrigation and Drainage Paper, 24. Rome, Italy 1977. 144p.

EBRAHIM, M. K.; ZINGSHEIM, O.; EL-SHOURBAGY, M. N.; MOORE P. H.; KOMOR E. Growth and sugar storage in sugarcane grown at temperatures below and above optimum. **Journal of Plant Physiology**, v. 153 p. 593-602. Marc. 1998.

FERNANDEZ, G. A. V.; RUDORFF, B. T.; HOMANN, C.; AGUIAR, D. A.; FONTENELLE, T. H.; VILELLA, W. M. C. Estimativa da necessidade de irrigação de cana-de-açúcar no Brasil. In: Inovagri International Meeting, 4; CONIRD – Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem, 26; SBS – Simpósio Brasileiro de Salinidade, 3., 2017, **Anais...** Fortaleza, 2017.

HERNANDEZ, F.B.T.; SOUZA, S.A.V. de; ZOCOLER, J.L.; FRIZZONE, J.A. Simulação e efeito de veranicos em culturas desenvolvidas na região de Palmeira d'oeste, estado de São Paulo. Jaboticabal, **Engenharia Agrícola**, v. 23, n. 1, p. 21-30, 2003.

HIGLEY, L. G.; PEDIGO, L. P.; OSTLIE, K. R. DEGDAY: a program for calculating degree-days, and assumptions behind the degree-day approach. **Environmental Entomology**, v. 15, n. 6, p. 999-1016, 1986.

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

INMAN-BAMBER, N. G. AND SMITH, D. M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field Crops Research**, v. 92, p. 185-202. Jun. 2005.

LEMOS FILHO, J. P.; VILLA NOVA, N. A.; PINTO, H. S. A model including photoperiod in degree days for estimating Hevea bud growth. **International Journal of Biometeorology**, v. 41, n. 1, p. 1-4, 1997.

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

RAMESH, P.; MAHADEVASWAMY, M. Effect of formative phase drought on different classes of shoots, shoot mortality, cane attributes, yield and quality of four sugarcane cultivars. **Journal of Agronomy and Crop Science**, Stuttgart, v. 185, p. 249-258, Dec. 2000.

SEGATO, S. V.; MATTIUZ, C. F. M.; MOZAMBANI, A. E. Aspectos fenológicos da cana-de-açúcar. **Atualização em produção de cana-de-açúcar**, Piracicaba, p.19-36, 2006.

SILVA, T. G. F.; MOURA, M. S. B.; ZOLNIER, S.; SOARES, J. M.; VIEIRA, V. J. S.; JÚNIOR, W. G. F. Demanda hídrica e eficiência do uso de água da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 12, p. 1257–1265, sep. 2011.

SILVA, T. G. F.; MOURA, M. S. B.; ZOLNIER, S.; JOSÉ M. SOARES, J. M.; VIEIRA, V. J. DE S.; JÚNIOR, W G. F. Requerimento hídrico e coeficiente de cultura da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 1, p. 64–71, nov. 2012.

SMITH D. M.; INMAN-BAMBER N. G. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field Crops Research**, 185-202 2005.

SOUZA, E. F.; BERNARDO, S.; CARVALHO, J. A. Função de produção da cana-de-açúcar em relação à água para três variedades sem Campos dos Goytacazes. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 19, p. 28-12, set. 1999.

TEIXEIRA, A. H. DE C.; LEIVAS, J. F.; RONQUIM, C. C.; VICTORIA, D. de C. Sugarcane Water Productivity Assessments in the São Paulo state, Brazil. **International Journal of Remote Sensing Applications**, v. 6, Jun. 2016.

THOMPSON, G. D.; BOYCE, J. P. Daily measurements of potential evapotranspiration from fully canopied sugarcane. **Agricultural Meteorology**, v. 4, p. 267-279, Jul. 1967.

VAN DILLEWIJN, C. Botany of Sugarcane. Waltham, Mass, U.S, Chronica Botanica; Nueva York: Stechert-Hafner, 1952. 371p.

WIEDENFELD, B. Scheduling water application on drip irrigated sugarcane. **Agricultural Water Management**, v. 64, p.169-181, 2004.

WIEDENFELD, B.; ENCISO, J. Sugarcane responses to irrigation and nitrogen in semiarid south Texas. **Agronomy Journal**, Madison, v. 100, p. 665-671, 2008.

CAPÍTULO 2

BALANÇO HÍDRICO E ESTIMATIVA DOS COEFICIENTES DE CULTIVO NA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR¹

Alberto Mario Arroyo Avilez², Fernando Braz Tangerino Hernandez³

¹ Apoio financeiro da FAPESP Processo 2.009/52.467-4

² Mestrando no Programa de Pós-Graduação em Irrigação e Drenagem, UNESP Botucatu. Email: betomario1494@gmail.com

³ Professor Titular da UNESP Ilha Solteira. Email: fbthtang@agr.feis.unesp.br

RESUMO

O balanço hídrico é uma importante ferramenta para o planejamento agrícola, principalmente uma vez que é utilizada a prática da irrigação com intuito de aplicar a quantidade de água necessária para a planta e desta forma alcançar a máxima produção. Neste sentido, o objetivo deste trabalho foi realizar a simulação do balanço hídrico da cultura da cana-de-açúcar com dados reais, uma segunda simulação para obtenção de recomendação de manejo da irrigação, para avaliar a capacidade operacional do sistema de irrigação e determinar uma lâmina média de projeto, e ainda determinar a relação ET_a/ET₀ nas diferentes fases fenológicas com a aplicação do modelo SAFER por meio do sensoriamento remoto. A primeira simulação teve valores de deficiência hídrica variando entre os 114 e 228 dias e produtividade entre 109,6 e 127,2 t ha⁻¹, enquanto que para a simulação que foi recomendada utilizando o mesmo sistema de irrigação, os dias que a cultura encontrou-se com deficiência hídrica diminuíram, ficando entre 25 e 46 dias, observou-se que o sistema de irrigação não tem a capacidade de aplicar as lâminas médias diárias necessárias para cultura que é entorno aos 4,1 mm/dia. No cálculo da determinação da relação ET_a/ET₀ o comportamento da curva formada pelos valores determinados, mostrou coerência com as curvas encontrados na literatura, entretanto os valores encontrados foram menores do que aqueles recomendados.

Palavras – chave: Deficiência Hídrica. Evapotranspiração. Irrigação. SAFER.

ABSTRACT

The water balance is an important tool for agricultural planning, especially since the practice of irrigation is used in order to apply the amount of water needed for the plant and thus reach maximum production. In this sense, the objective of this work was to simulate the water balance of the sugar cane crop with real data, a second simulation to obtain an irrigation management recommendation, to evaluate the operational capacity of the irrigation system and to determine a and to determine the ET_a/ET₀ ratio in the different phenological phases with the application of the SAFER model by means of remote sensing. The first simulation had values of water deficiency varying between 114 and 228 days and productivity between 109.6 and 127.2 t ha⁻¹, whereas for the simulation that was recommended using the same irrigation system, the days that the crop were found to be deficient in water, being between 25 and 46 days, it was observed that the irrigation system does not have the capacity to apply the average daily slides needed for culture that is around 4.1 mm/day. In the calculation of the determination of the ET_a/ET₀ relation, the behavior of the curve formed by the determined values, showed coherence with the curves found in the literature, however the values found were lower than those recommended.

Keywords: Water Deficit. Evapotranspiration. Irrigation. SAFER.

2.1 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é uma cultura que apresenta elevada importância socioeconômica no Brasil. O Estado de São Paulo é o maior produtor com 365,990 milhões de toneladas e uma produtividade meia de 77,27 t ha⁻¹.

De todo o volume de água consumido pela cultura da cana-de-açúcar somente 30% constitui o peso de massa seca, os outros 70% restantes é utilizado para o desenvolvimento, isto dependendo do estádio fenológico (Inman-Bamber e Smith, 2005), para manter índices satisfatórios na produção, a cultura necessita entre 1500 mm e 2500 mm de água durante seu ciclo (DOORENBOS E KASSAM, 1979).

Estudos vêm sendo realizados para determinar corretamente o consumo de água pelas culturas e assim poder maximizar o uso de recursos hídricos. A irrigação cada vez vem sendo mais utilizada pelo sua grande influência na produtividade e o manejo que também influencia ao final nos custos de produção da cana-de-açúcar (TEODORO et al., 2013). Neste contexto, o balanço hídrico tem se mostrado uma importante ferramenta para o planejamento agrícola, (SANTOS et al., 2010), pois pode ser quantificada a disponibilidade hídrica de uma região evidenciando as variações de excedentes ou deficiência hídrica no solo caraterizadas principalmente pelas entradas e saídas de agua que se dá por meio das precipitações e evapotranspiração respetivamente (PEREIRA et al., 2002).

Para calcular as necessidades hídricas das plantas é feita a estimativa da evapotranspiração da cultura (ETc) e esta é regida pelos balanços de radiação e energia, que permitem conhecer a quantidade de energia que foi dividida entre o fluxo de calor sensível e latente (ASSENG E HSIAO, 2000; SHEN et al., 2004). Conhecer o valor da ETc e relaciona-la com os valores de evapotranspiração de referênciaria ET₀ nos resultaria o valor de coeficientes de cultivo (K_c), no entanto, devido à presença de pragas e doenças, salinidade, baixa fertilidade do solo e escassez ou saturação de água, a ETc se torna diferente do valor encontrado, sendo chamado está de evapotranspiração atual (ET_a) (PEREIRA et al., 2002; ALLEN et al., 2005). Assim para estes casos, a determinação do K_c para uma cultura em campo se daria por meio da relação ET_a/ET₀. Para chegar nesta relação, Silva et al., (2012) destacam o método do balanço de energia com base na razão de Bowen, Zhang et al., 2015 destaca a combinação de métodos micrometeorológicos usando Eddy Covariance (*Covariância de Vórtices Turbulentos*) junto com sensoriamento

remoto usando o modelo METRIC (Mapping Evapotranspiration at High Resolution using Internalized Calibration), ou ainda o modelo recomendado por Teixeira et al., (2016) o algoritmo SAFER (Simple Algorithm for Retrieving Evapotranspiration), que tem sido utilizado no Brasil e apresentada bons resultados.

Diante disto, o objetivo deste trabalho foi realizar a simulação do balanço hídrico da cultura da cana-de-açúcar com dados reais, uma segunda simulação para obtenção de recomendação de manejo da irrigação, para avaliar a capacidade operacional do sistema de irrigação e determinar uma lâmina média de projeto, e ainda determinar a relação ET_a/ET₀ nas diferentes fases fenológicas com a aplicação do modelo SAFER por meio do sensoriamento remoto.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi conduzido em uma área comercial de cana-de-açúcar do município de Andradina, tendo como coordenadas geográficas latitude 20° 43' 43,6" S; longitude 51° 16' 30,3" W e altitude 360 m (Figura 1), sob clima, segundo classificação de Köppen, do tipo tropical com inverno seco (Aw) (UNICAMP, 2018), com precipitação anual média 1241,6 mm e temperatura do ar entre de 19,7 a 26,9°C e umidade relativa média é de 62,4% (UNESP, 2018).

2.2.1 Manejo da Irrigação realizado durante o ciclo produtivo da safra (2016 - 2017)

O manejo da irrigação foi realizado para 10 talhões de aproximadamente 20 hectares cada um divididos por 3 e até 5 setores cada um, baseando-se no balanço hídrico da cultura, que foi realizado a partir de dados diários de chuva, lâmina líquida a ser aplicada e evapotranspiração da cultura. As necessidades hídricas da cultura da cana-de-açúcar foram estimadas diariamente através do cálculo da ET_c (Equação 1), utilizando-se a ET₀ por Penman-Monteith fornecidas por uma estação agrometeorológica localizada a 5,25 Km da área de estudo e coeficientes de cultivo adaptados para condições do estudo, entretanto seguindo o conceito dos coeficientes de cultivo simples (K_c single) propostos por (DOORENBOS e PRUITT, 1977) e introduzida globalmente na FAO 24, a curva do K_c apresentada é como uma série de quatro segmentos lineares que representam o desenvolvimento inicial,

médio, períodos de crescimento da safra e tardia, onde também são sugeridos por Allen et al. (1998).

Os coeficientes de cultivo adaptados para a área do estudo variam no primeiro segmento de 0,6 até 1,1 numa duração de 180 dias após plantio, compreendendo a fase I (Brotação e estabelecimento da cultura) e parte da fase II (Estabelecimento e perfilhamento), o segundo segmento varia de 1,1 até 1,2 numa duração de 60 dias, compreendendo o final da fase II e o começo da fase III (Crescimento máximo) que termina no final do terceiro segmento da curva que se mantém no valor máximo de Kc de 1,2 com uma duração de 60 dias e assim fechando nos 300 dias após o plantio da cultura. O quarto segmento da curva compreende a fase de maturação que é representada por valores decrescentes variando de 1,2 até 0,9 durante 65 dias, desta forma o ciclo da cultura completaria os 365 dias, e quando a ocorreu a necessidade da cultura permanecer em campo por fins de otimização da operação da colheita, o coeficiente utilizado foi 0,9.

$$ETc = ETo * Kc \quad (1)$$

Em que:

ETc = Evapotranspiração da cultura (mm/dia).

ETo = Evapotranspiração de referência (mm/dia).

Kc = Coeficiente de Cultura (singel).

O balanço hídrico diário foi realizado para cada talhão durante o ciclo total da cultura, com capacidade de água disponível (CAD) de 100 mm, já que se trabalhou com uma CAD de 1 mm/cm e uma profundidade radicular de 100 cm, sendo o tipo de solo predominante Argissolos.

O planejamento da irrigação foi realizado considerando-se o esgotamento máximo de 60% da CAD (Crítico) para que não haja comprometimento ao potencial produtivo da cultura e realizando-se a irrigação até um 90% da CAD, isto para fins de aproveitamento da chuva, assim possibilitando chegar a CAD até o 100%.

A irrigação foi realizada mediante a um sistema de irrigação de gotejamento subterrâneo que apresenta as características apresentadas na Tabela 1.

2.2.2 Manejo de irrigação recomendado para otimizar o sistema

Foi realizada uma simulação do manejo da irrigação para a mesma área (Figura 1), com as mesmas características do solo, o balanço hídrico para estimar a quantidade de água necessária no momento exato também foi realizado com os mesmos dados de CAD, fator de restrição hídrica e chuva aos descritos anteriormente, para esta simulação a irrigação foi feita de forma diferente, com um turno de rega fixo de 5 dias para cada um dos talhões, sendo irrigados dois talhões diariamente, usando-se as 24 hrs do dia, ou seja, um máximo de 12hrs operacionais para cada talhão o que representaria uma lâmina máxima de 16,7 mm. O sistema de irrigação utilizado foi o mesmo descrito anteriormente na Tabela 1.

Figura 1 - Localização da área de estudo, distância até a estação agrometeorológica e número de setores na área Andradina.

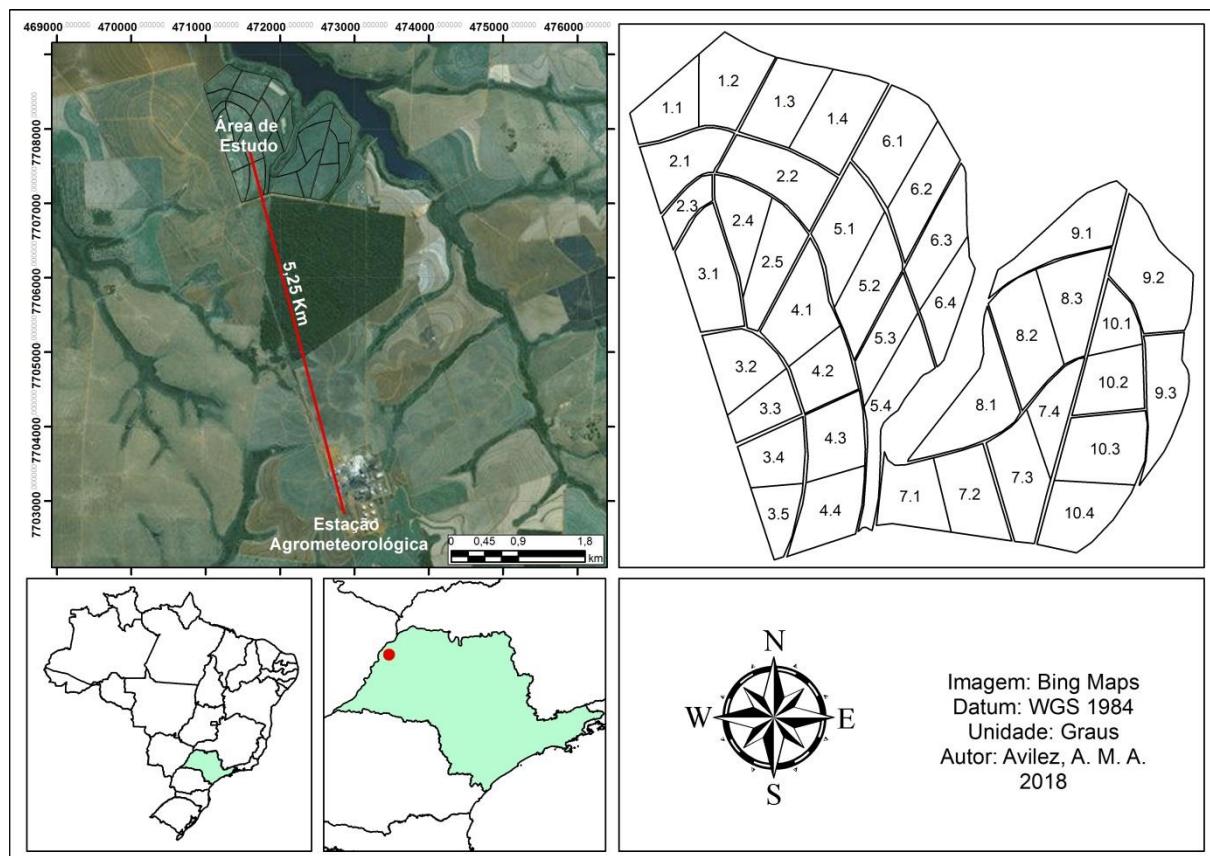


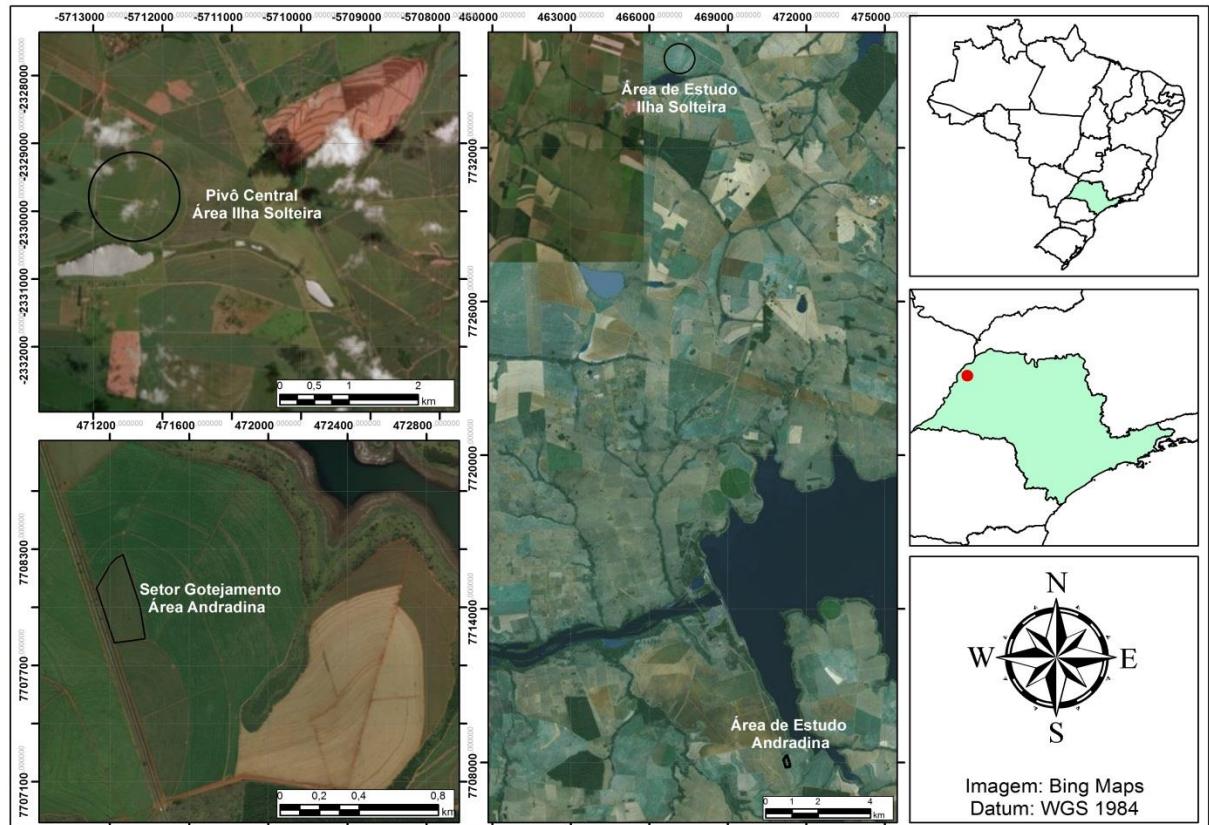
Tabela 1: Características operacionais do sistema de irrigação por gotejamento subterrâneo.

Talhões	Variedade	Área	Vazão do emissor	Precipitação	Tempo	Lâmina
		ha	L/hr	mm/hr	hr	mm/dia
2.1 a 2.5	CTC 4	23,74	1,0	1,4	2,4	3,3
3.1 a 3.5	RB96	23,44	1,0	1,4	2,4	3,3
7.1 a 7.4	CTC 15	22,08	1,0	1,4	2,4	3,3
8.1 a 8.3	CTC 15	20,81	1,0	1,4	2,4	3,3
9.1 a 9.3	CTC 15	20,88	1,0	1,4	2,4	3,3
10.1 a 10.4	CTC 15	20,79	1,0	1,4	2,4	3,3
1.1 a 1.4	CTC 4	23,84	1,0	1,4	2,4	3,3
4.1 a 4.4	CTC 4	21,38	1,0	1,4	2,4	3,3
5.1 a 5.4	CTC 4	22,62	1,0	1,4	2,4	3,3
6.1 a 6.4	RB96	25,64	1,0	1,4	2,4	3,3

2.2.3 Determinação dos coeficientes de cultivo (ET_a/ET₀) e a Evapotranspiração atual da cultura (ET_a) com o uso do modelo SAFER

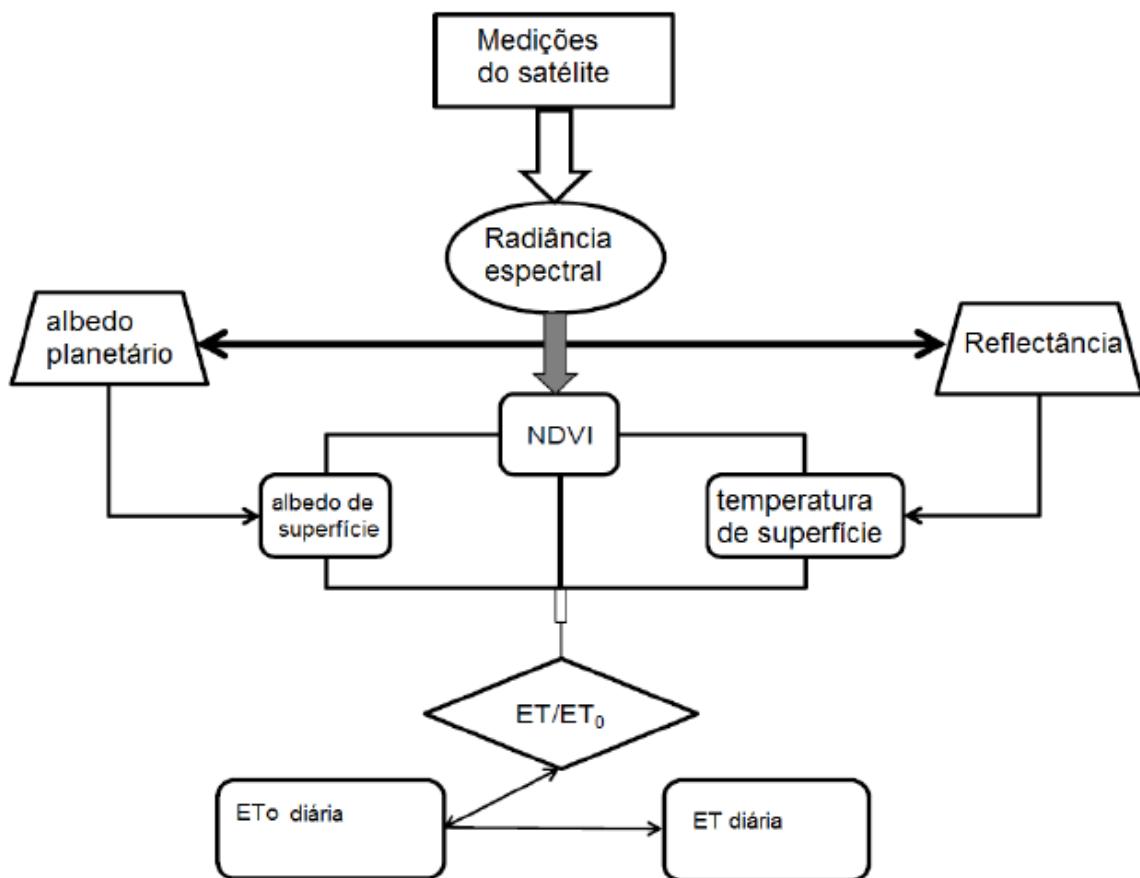
As áreas de estudo são representadas na Figura 2, demonstrando-se a área Andradina (gotejamento) e a área Ilha Solteira (Pivô Central).

Figura 2 - Localização das áreas de estudo, Andradina e Ilha Solteira.



Após a identificação das áreas de cana-de-acúcar e construção dos polígonos foi realizada a modelação da ET_a e a ET_a/ET₀ por meio do modelo SAFER (Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving) (Teixeira et al., 2012), baseado na equação de Penman-Monteith para obter a evapotranspiração atual em larga escala. No SAFER a relação ET_a/ET₀ (coeficiente de cultura atual) foi modelada como expressa a Figura 3, a implementação foi de acordo com o exposto por Teixeira (2010), porém utilizando o coeficiente “a” igual a 1,0 proposto por (Hernandez et al., 2012; Teixeira et al., 2013) que preliminarmente compararam os modelos sob condições de irrigação por pivô central no noroeste de São Paulo, tomando-se como referência o manejo de água baseado no tradicional método da FAO (ALLEN et al., 1998).

Figura 3 - Fluxograma das etapas do método SAFER (2012) utilizando a superfície albedo, a superfície temperatura e do NDVI.



Fonte: Teixeira et al,2012

2.2.3.1 Aquisição da base de dados

As imagens utilizadas foram obtidas do site da USGS (<http://earthexplorer.usgs.gov/>) das plataformas Landsat 8, com órbita 222 e ponto 74 e 73, para o período de 2016-2017. As imagens de nível 1 com processamento de dados LPGS e livre de nuvens foram as utilizadas para continuar com os próximos passos do processamento.

2.2.3.2 Processamento

Antes da obtenção da estimativa da evapotranspiração e a Realação ET_a/ET₀ via sensoriamento remoto às imagens foram processadas, com correções geométricas, calibrações radiométricas e informações biofísicas. O geoprocessamento das informações foi realizado com auxilio do software ILWIS (Integrated Land Water Information System) que na função script possibilitou os cálculos dos dados no formato matricial (raster).

Foram utilizados dados de radiação global ($MJ \cdot m^{-2} \cdot dia^{-1}$), evapotranspiração de referência ($mm \cdot dia^{-1}$) e temperatura média diária do ar ($^{\circ}C$), a partir da Rede Agrometeorológica do Noroeste Paulista (<http://clima.feis.unesp.br/>), operada pela Área de Hidráulica e Irrigação da UNESP Ilha Solteira.

A correção radiométrica das imagens foi realizada de acordo com a metodologia de Teixeira et al.(2015b) e o albedo planetário de banda larga em cima da atmosfera (α_{TOA}) foi calculado utilizando a metodologia de Teixeira et al. (2015a), enquanto a temperatura de brilho do sensor (T_{bri}) foi obtida através da metodologia de Teixeira et al. (2015b). O índice de vegetação de diferença normalizada (NDVI) foi calculado através da relação entre a diferença entre as reflexibilidades planetárias do infravermelho próximo (ρ_{nir}) e vermelho ($\rho_{vermelho}$) e sua soma.

Os dados de α_{TOA} e T_{bri} foram corrigidos atmosfericamente para obter os valores de albedo (α_0) e temperatura da superfície (T_0 , $^{\circ}K$), de acordo com Teixeira et al. (2015b):

$$\alpha_0 = 0,61 * \alpha_{TOA} + 0,08 \quad (2)$$

$$T_0 = 1.07 * T_{bri} - 20.17 \quad (3)$$

A relação entre evapotranspiração atual e evapotranspiração de referência (ET_a/ET₀) SAFER foi calculada de acordo com a Equação 3 (Hernandez et al., 2014; Teixeira. 2010; Teixeira et al., 2015c):

$$\left(\frac{ET_a}{ET_0}\right)_{SAFER} = \exp\left(1.0 + 0.008\left(\frac{T_0}{\alpha_0 NDVI}\right)\right) \quad (4)$$

A evapotranspiração atual (ET_a, mm.dia⁻¹) foi obtida de acordo com Teixeira et al. (2015c):

$$ET_a = ET_0 \left(\frac{ET_a}{ET_0}\right) \quad (5)$$

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

2.3.1 Manejo da Irrigação realizado durante o ciclo produtivo da safra (2016 - 2017)

Na Tabela 2 e a Figura 8 são apresentados os resultados da irrigação realizada na cultura da cana-de-açúcar para a safra 2016 – 2017 e os números de dias que a cultura esteve com deficiência hídrica, sendo estes representados na Figura 8 nos anexos como os dias, que a linha que representa a água disponível ficou por baixo da linha do limite de segurança. Observa-se que os talhões que apresentaram maior necessidade hídrica (valores de ET_c) foram os que aplicaram-se uma quantidade maior de água, em média 600 mm, para uma necessidade da cultura de aproximadamente 1600 mm, por tanto também observa-se que os talhões com menores valores de necessidade hídrica foram os que começaram o ciclo no dia 05/11/2016 que corresponderam a um menor número de dias de duração do ciclo produtivo (330 dias) e assim a quantidade de água irrigada foi em média de 390 mm com exceção do talhão 1.1 a 1.4 que foi irrigado com 300,3 mm durante seu ciclo total, 15,4% a menos que os outros dois talhões.

Tabela 2. Necessidade hídrica, chuva, lâmina de irrigação, produtividade e numero de dias com déficit para a safra 2016 – 2017.

Talhões	Início do ciclo	4o. Ciclo	Variedade	ETo Media	ETc	Chuva	Irrigação	Produtividade	Deficif
	Data	Dias		mm/dia	mm/safra	mm/safra	mm/safra	t/ha	Dias
2.1 a 2.5	05/11/2016	330	CTC 4	4,3	1361	1156	386,8	112,1	136
3.1 a 3.5	28/06/2016	364	RB96 - 6928	4,3	1571	1350	584,5	126,8	130
7.1 a 7.4	08/08/2016	389	CTC 15	4,3	1610	1421	630,2	127,2	114
8.1 a 8.3	08/08/2016	389	CTC 15	4,3	1610	1421	573,8	127,2	172
9.1 a 9.3	08/08/2016	389	CTC 15	4,3	1610	1421	604,5	127,2	152
10.1 a 10.4	08/08/2016	389	CTC 15	4,3	1610	1421	506,4	127,2	150
1.1 a 1.4	05/11/2016	330	CTC 4	4,3	1361	1156	300,3	112,1	157
4.1 a 4.4	15/09/2016	381	CTC 4	4,4	1595	1319	593,6	112,1	228
5.1 a 5.4	15/09/2016	381	CTC 4	4,4	1595	1319	508,0	112,1	184
6.1 a 6.4	05/11/2016	330	RB92 - 579	4,3	1361	1156	398,0	109,6	151

Para todos os talhões a soma da chuva com a quantidade de água aplicada é maior que a necessidade requerida pela cultura, mas ainda assim todos os talhões tiveram dias em situação em que a cultura esteve com deficiência hídrica, isto devido ao volume total de chuva não ter sido bem distribuídos durante o ciclo da cultura, e assim existiram dias onde a quantidade de água necessária pela cultura não foi reposta no solo. Hernandez et al. (2003) destacaram que a região Noroeste Paulista, são altas as probabilidades de ocorrência de veranicos críticos para as diferentes culturas agrícolas, sendo o desenvolvimento da agricultura na região sem o uso da irrigação uma atividade de alto risco.

O talhão composto pelos setores 4.1 a 4.4, foi o que apresentou maior número de dias com escassez hídrica, 228 dias no total, também pode-se observar que o manejo da irrigação que aplicou uma lâmina total de 593,6 mm, não foi realizado da melhor forma. Quando comparado com o talhão 5.1 a 5.4 que correspondeu ao mesmo ciclo da cultura e apresentou um número de dias com deficiência hídrica menor (184 dias) e a lâmina total aplicada foi de 508 mm, ou seja, 85,6 mm a menos com relação a anterior, com isso nota-se que o manejo da irrigação para este talhão foi melhor executado, do que no talhão 4.1 a 4.4. De acordo com Pires et al. (2008), o manejo racional da água de irrigação depende de um bom planejamento das irrigações, de monitoramento da umidade do solo, das precipitações e da evapotranspiração.

Um dos fatores que contribuiu para esta diferença foi que no talhão 5.1 a 5.4 as irrigações foram feitas com uma frequência de dias menores e com lâminas menores (Figura 8I), assim a água aproveitada pela chuva foi maior e consequentemente a

quantidade de água irrigada também. Já o talhão 4.1 a 4.4 foram aplicadas lâminas maiores e quando ocorreram às chuvas (Figura 8H), ultrapassava a capacidade de retenção de água no solo.

Ainda na Tabela 2, observa-se que os valores da produtividade estão correlacionados com as lâminas totais aplicadas, o número de dias com déficit hídrico e a duração do ciclo da cultura. O talhão 7.1 a 7.4 apresentou uma das maiores produtividades, $127,2 \text{ t ha}^{-1}$, sendo este o que aplicou a maior lâmina de irrigação com menor número de dias com escassez hídrica, sendo o seu ciclo produtivo maior com 365 dias, corroborando com Doorenbos e Kassam (1979) que também alcançaram resultados satisfatórios considerando o mesmo período do ciclo, encontrando rendimento entre 100 e 150 t ha^{-1} em áreas irrigadas nos trópicos e subtrópicos secos.

Os talhões 3.1 a 3.5; 8.1 a 8.3; 9.1 a 9.3 e 10.1 a 10.4, do mesmo modo, apresentaram produtividades médias de 127 t ha^{-1} , sendo aplicadas maiores lâminas de irrigação, entre os 500 mm e 630 mm (Tabela 2). O aumento das lâminas de irrigação é um fator importante para aumentar a produtividade, de acordo com Carvalho et al. 2009, a elevação no rendimento bruto de açúcar e na produtividade dos colmos estão relacionado com o aumento do nível de irrigação, ainda para Gava et al. (2011), em estudos avaliando a produtividade da cana-de-açúcar sob manejos de sequeiro e irrigado por gotejamento, encontraram que a produtividade média elevou em 20% no primeiro ciclo da cana-planta e de 28% no segundo ciclo (cana soca), quando submetidas a irrigação.

Os outros talhões restantes (Tabela 2) tiveram as menores produtividades, $112,1 \text{ t ha}^{-1}$ e $109,6 \text{ t ha}^{-1}$, sendo que no talhão 6.1 a 6.4 foi encontrada a menor produtividade, $109,6 \text{ t ha}^{-1}$, 13,8% menor com relação a máxima produtividade da área. Estes valores encontram-se dentro dos valores de produtividade considerados como satisfatórios por Doorenbos e Kassam (1979) sendo maiores que 100 t ha^{-1} para cana irrigada, entretanto quando comparado com trabalhos realizados por Mattioli et al. (1998) onde observaram que, ao aplicar uma lâmina média mensal de 30 mm por meio de uma irrigação complementar, partindo de uma produtividade de 100 t ha^{-1} , a irrigação proporcionou um aumento na produtividade em aproximadamente $30,4 \text{ t ha}^{-1}$ para cana-soca, assim como Farias (2001), encontrou uma diferença significativa entre o aumento da produtividade de $28,26 \text{ t ha}^{-1}$.

Destes talhões com produtividades menores, o 2.1 a 2.5, 1.1 a 1.4 e 6.1 a 6.4 foram aplicadas as menores lâminas de irrigação e ainda tiveram um ciclo produtivo menor, de 330 dias. Já os talhões 4.1 a 4.4 e 5.1 a 5.4 tiveram um ciclo produtivo maior de 389 dias e uma lâmina total maior 593,6 mm e 508 mm respectivamente, contudo a produtividade foram similares de $112,1 \text{ t ha}^{-1}$, isto deve-se a cultura ter sido submetida a os números máximos encontrados de dias ao déficit hídrico (entre 136 e 228 dias), o que consequentemente afetou na produtividade. Para Silva et al. (2014), o déficit por falta de água é normalmente caracterizado por perda de clorofila e um declínio progressivo na capacidade fotossintética das plantas. Assim Silva et al. (2012), estudando cana-de-açúcar submetida a 70 dias de déficit hídrico verificaram valores médios próximo a 30 índice SPAD (Soil Plant Analysis Development), sendo que segundo Torres Netto et al. (2005), leituras SPAD inferiores a 40 indicam o início da deficiência de clorofila, o que afeta o processo fotossintético e a produtividade final nas culturas.

Contudo o aumento da produtividade de uma cultura usando a irrigação não depende somente da lâmina aplicada senão também da qualidade do manejo realizado, segundo Salassier et al. (2002), a irrigação é um método que busca maximizar a produção, levando em consideração parâmetros como: quando irrigar e quanto irrigar, não considerando apenas a captação e condução da água, mas toda a operação integrada para que consiga uma equidade na distribuição da agua.

Em áreas irrigadas o manejo da irrigação se da com base no balanço hídrico, na cultura da cana-de-açúcar grandes expansões têm sido observadas em áreas com maior deficiência hídrica, levando à maior necessidade de irrigação suplementar (ANA, 2017), estas áreas que realizam a irrigação suplementar ou de salvamento só estaria possivelmente garantindo o desenvolvimento da cultura e não estaria conseguindo a máxima produtividade. Portanto, determinar se a irrigação deverá ser fixa ou variável durante o ciclo aplicando lâminas que reponham a necessidade hídrica total ou parcial da cultura, são decisões econômicas, que devem ser baseadas em estudos que levem em consideração a evapotranspiração da cultura, variedades, tipo de solo, investimentos e custo operacional de cada sistema (BISPO et al., 2017).

2.3.2 Manejo de irrigação recomendado para otimizar o sistema de irrigação

Tabela 3. Simulação de manejo da irrigação utilizando turno de rega fixo de 5 dias.

Talhões	Inicio do ciclo	4o. Ciclo dias	ETo total mm/safra	ETc mm/safra	Chuva mm/safra	Irrigação mm/safra	Deficif Dias
2.1 a 2.5	05/11/2016	330	1412,6	1361	1156,4	519,6	37
3.1 a 3.5	28/06/2016	364	1580,1	1571	1350,4	634,5	40
7.1 a 7.4	08/08/2016	389	1660,6	1610	1420,9	654,1	25
8.1 a 8.3	08/08/2016	389	1660,6	1610	1420,9	663,8	33
9.1 a 9.3	08/08/2016	389	1660,6	1610	1420,9	672,0	35
10.1 a 10.4	08/08/2016	389	1660,6	1610	1420,9	653,8	33
1.1 a 1.4	05/11/2016	330	1412,6	1361	1156,4	509,1	49
4.1 a 4.4	15/09/2016	381	1667,7	1595	1318,7	611,7	49
5.1 a 5.4	15/09/2016	381	1667,7	1595	1318,7	613,9	56
6.1 a 6.4	05/11/2016	330	1412,6	1361	1156,4	512,4	45

A Tabela 3 e a Figura 9 em anexos representa o manejo da irrigação recomendado para uma o ciclo produtivo da safra 2016 – 2017, a simulação realizada para um turno de rega de 5 dias, sugere realização de irrigação de 2 talhões por dia e assim fechar os dez talhões nos 5 dias. A escolha deste turno de rega foi feita visando um melhor aproveitamento do sistema, facilitar o manejo operacional e levando em consideração o objetivo de irrigar antes que a razão entre a quantidade de água no solo seja menor do que a quantidade de demanda pela evapotranspiração da cultura, o que acarretaria em deficiência de água por um maior espaço de tempo e o que pode levar a influenciar no rendimento da cultura.

Os resultados obtidos com o turno de rega de 5 dias se mostraram satisfatórios em comparação com os que foram realizados na área, desde o ponto de vista dos dias que a cultura se encontrou com déficit hídrico, estes valores diminuíram com relação aos encontrados no manejo realizado na Tabela 2. Observa-se que o maior número de dias com déficit hídrico da cultura encontrado foi de 56 dias e uma lâmina total de 613,9 mm para o talhão 5.1 a 5.4 (Tabela 3 e Figura 9I), o menor valor demonstrado na simulação foi para o talhão 7.1 a 7.4 com 25 dias e uma lâmina total de 654,1 mm (Tabela 3 e Figura 9C). Já para os demais talhões os dias com déficit hídrico estariam entre os 30 e 50 dias e lâminas totais aplicadas entre 500 mm e 680 mm, com isso consta-se que o incremento nas lâminas aplicadas nos talhões dependeu basicamente do número de dias do ciclo da cultura.

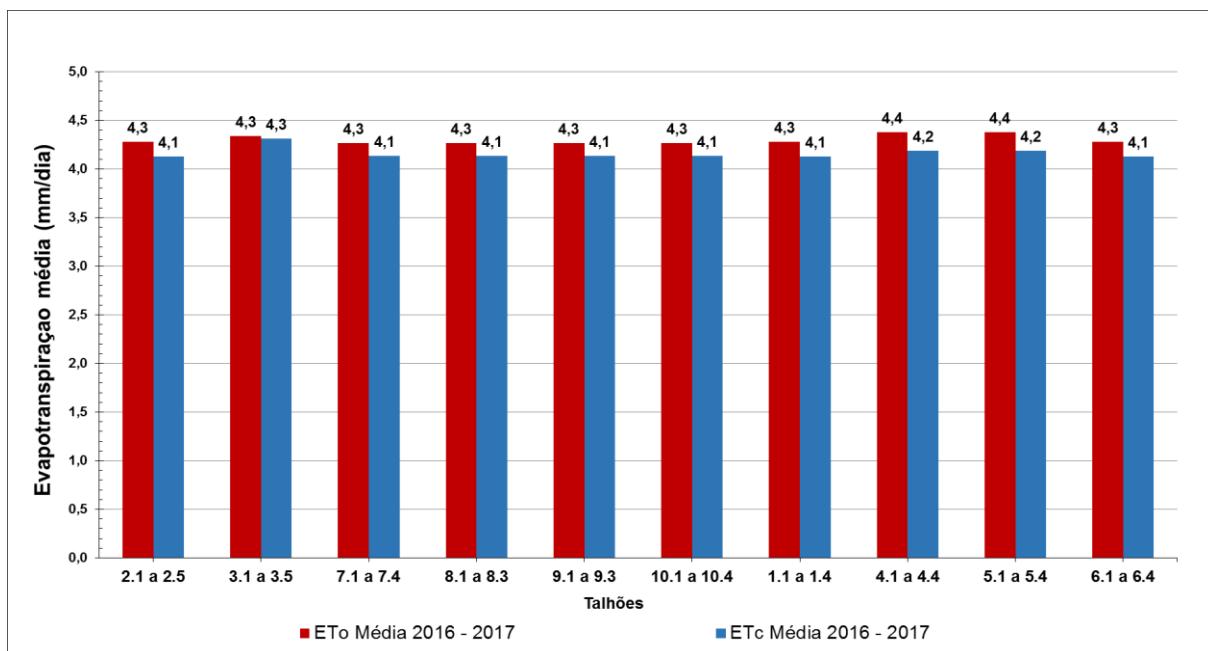
Diante disto, considera-se que um bom manejo da irrigação e eficiência de utilização de água (EUA) como foi feita nesta simulação, aumentaria a produtividade da cultura, assim como foi encontrado por Silva et al. 2014, ao analisar a variação da

produtividade de açúcar (TPH), produtividade de colmos (TCH), observaram uma interação significativa com o aumento das lâminas aplicadas. O Aumento da lâmina líquida ate a lâmina necessária ou a distribuição da quantidade requerida de água no momento certo que a planta precisa leva a boa disponibilidade de água no solo favorecendo o desenvolvimento da planta, e tendo como resultado final um aumento na produtividade, já que se a planta encontrar condições favoráveis, sem deficiência hídrica, ocorrerá um melhor aproveitamento da radiação solar e consequentemente realização do processo de fotossíntese(INMAN-BAMBER e SMITH, 2005).

Considerando a realização de um manejo da irrigação racional para estas áreas com o máximo aproveitamento de água pela cultura, seja da chuva ou irrigação, espera-se um aumento da produtividade e queda nos custos de produção, assim um manejo combinando os dados das precipitações médias mensais na região proporcionarão menor custos pelos sistemas de irrigação, Segundo Ascoli et al. (2017), em estudos realizado na região Noroeste Paulista, encontraram que para épocas de colheita de abril a junho e de outubro a novembro a necessidade hídrica da cultura nos 12 meses seguintes é menos atendida pela precipitação pluviométrica do que a cana-de-açúcar colhida de julho a setembro.

O manejo da irrigação realizado e recomendado foi feito para aproveitar ao máximo a capacidade do sistema de irrigação, mas ainda assim observa-se que o sistema instalado na área não é capaz de aplicar a lâmina média requerida pela cultura, na Figura 4 observa-se que as lâminas médias para cada talhão, variaram de 4,1 ate 4,3 mm/dia, estes valores representam a lâmina média necessária para atender a cultura, porém na Tabela 1 esta representada a lâmina máxima do sistema atual, 3,3 mm/dia. Por tal razão se a lâmina máxima do sistema é inferior á média requerida pela cultura, não seria possível realizar irrigações para levar o solo até capacidade de campo durante o ciclo total da cultura.

Figura 4 – Valores diários médios da evapotranspiração de referência e da cultura para cada talhão na safra 2016 - 2017.



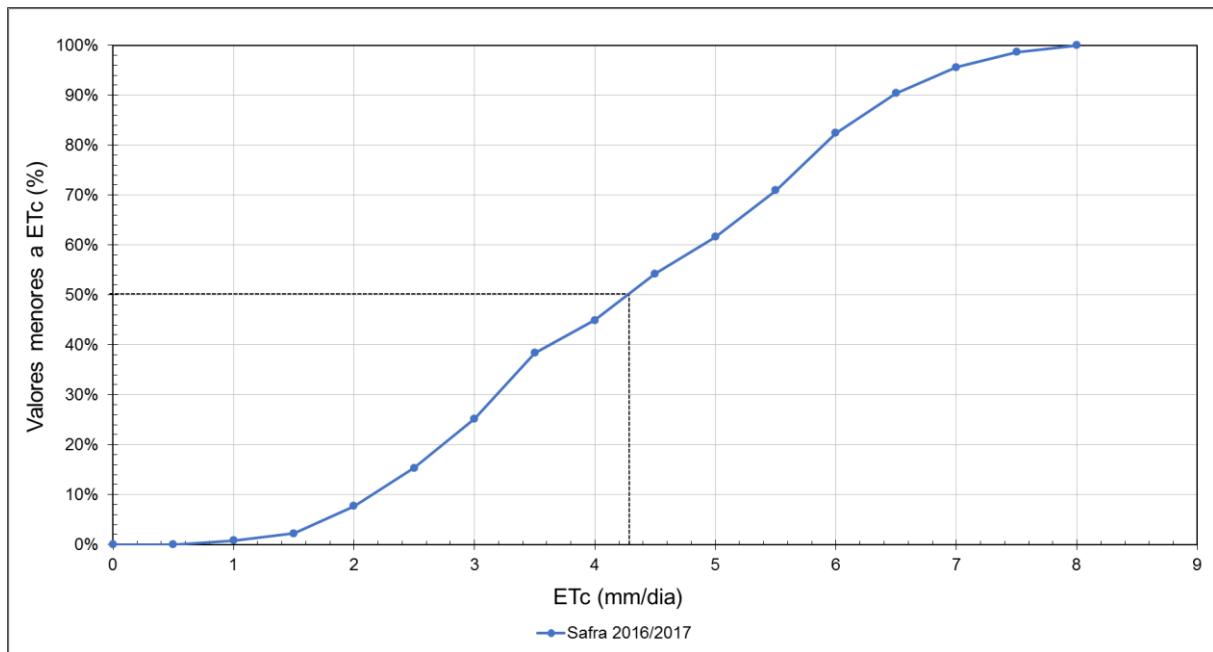
Por tanto, determinar o valor da ETc regional e realizar estudos analisando variáveis climáticas são necessárias para escolha de um bom sistema de irrigação, uma vez que um dos valores de saída de água do solo se da pela evapotranspiração, segundo Hernandez et al. (2003), a região do Noroeste Paulista apresenta as maiores taxas de evapotranspiração do Estado de São Paulo e isto influencia diretamente na lâmina que um sistema precisará aplicar para suprir a água necessária pela planta.

Além da escolha apropriada da lâmina de projeto, quando trabalha-se com áreas divididas por talhões, o manejo da irrigação é um fator importante e que precisa de estudos rigorosos, como a rotação dos ciclos de produção entre talhões, para que não aconteça necessidade hídrica simultaneamente entre talhões maiores à lâmina média com que foi dimensionado o projeto, já que durante o ciclo total à cultura exige necessidades diárias de água dadas pelo cálculo da ETc maiores ou menores à média diária do ciclo, como é representado na Figura 5.

Combinando estes valores máximos e mínimos entre talhões, torna-se possível realizar e aplicar as lâminas necessárias pela cultura. Estes valores variam segundo a variação da ETo na região ou a fase de desenvolvimento da cultura, o ciclo representado na Figura 5 teve valores variando de 0,5 mm/dia até 7,9 mm/dia, Thompson e Boyce (1967) também encontraram valores máximos de ETc igual a 6,8

mm dia⁻¹ durante o ciclo total, Inman-Bamber e Smith (2005) citam valores igual a 7,8 mm dia⁻¹.

Figura 5 – Distribuição da frequência da ETc durante a safra 2016 – 2017.

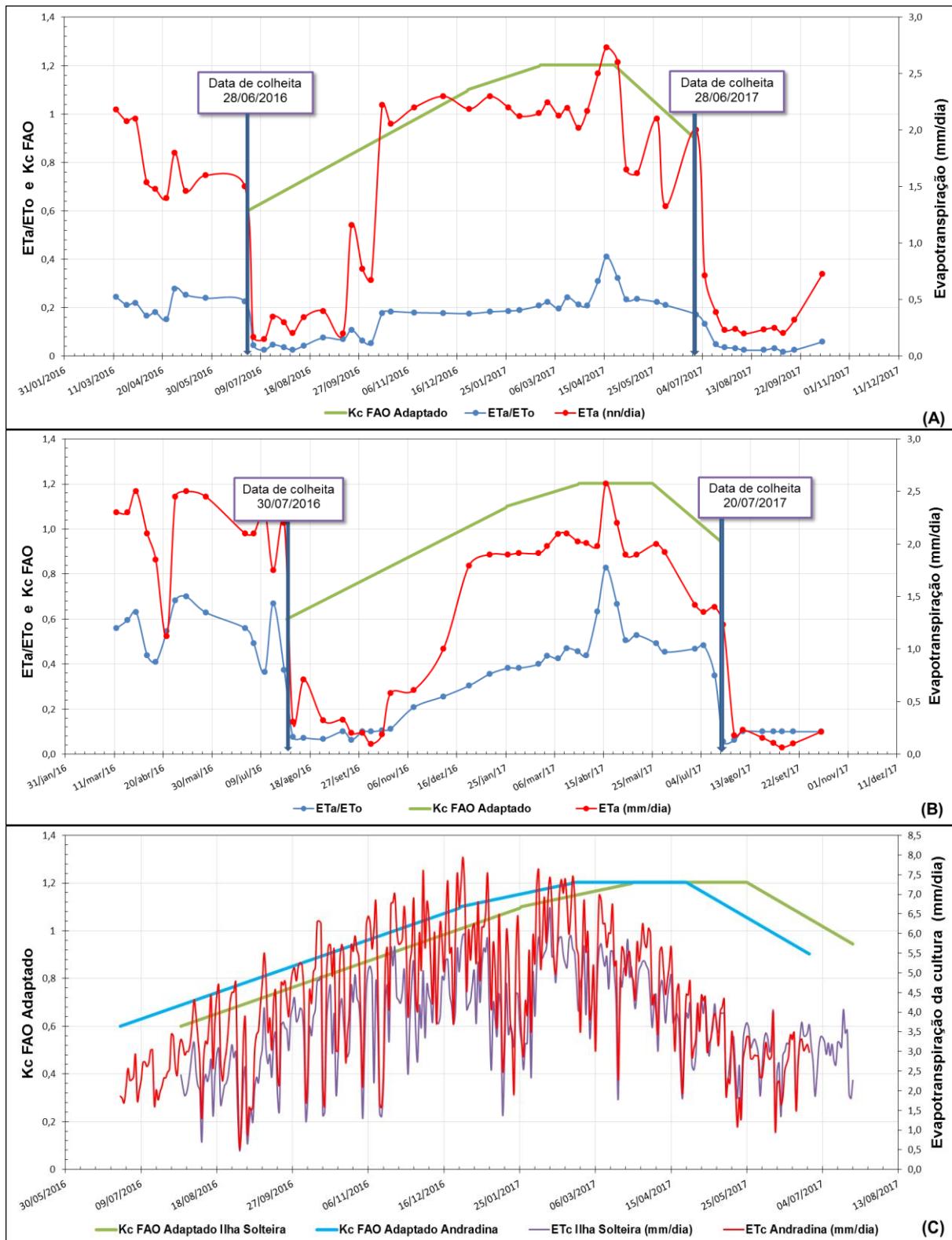


1.3.3 Determinação dos coeficientes de cultivo (ETa/ET0) e a Evapotranspiração atual da cultura (ETa) com o uso do modelo SAFER

Na Figura 6 é demonstrada a variação da ETa/ET0, obtida a partir do modelo SAFER, e a ETa para o final da safra 2015 - 2016, toda a safra de 2016 - 2017 e o início da safra 2017 - 2018, da área Andradina e Ilha Solteira, como indicado na Figura 2. As linhas azuis representam os valores da relação ETa/ET0, as linhas verdes representam os valores do Kc FAO que foi adaptado para a região e as linhas vermelhas os valores de ETa.

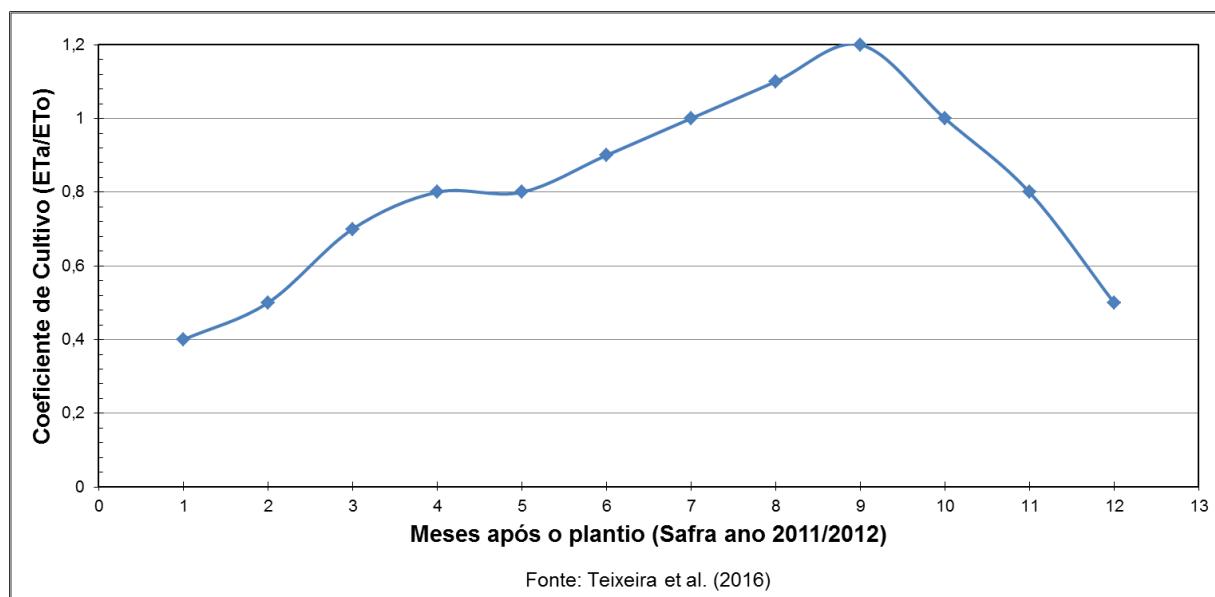
Para a área de Andradina e Ilha Solteira foi determinada a relação ETa/ET0, entre estas não observou-se variação nos valores máximos e mínimos de ETa/ET0 (Figura 6a e Figura 6b) quando analisados os dados totais determinados. Contudo, quando os valores são comparados dia a dia, nota-se variação entre as áreas, isto ocorre devido as diferentes datas de início do ciclo, diferença na disponibilidade hídrica no solo e a variação da ET0.

Figura 6 - Comparação do coeficiente de cultura FAO (Kc) para a cana-de-açúcar com a relação (ET_a/ET₀) e a evapotranspiração atual da cultura (ET_a) (A) área Andradina e (B) área Ilha Solteira e a evapotranspiração da cultura em área Andradina e Ilha Solteira (C)



Ainda da Figura 6, observa-se que os valores representados no gráfico de ET_a/ET₀ se mostraram baixos em comparação com os valores de *Kc* adaptados para a cana-de-açúcar, diferindo também dos determinados por Teixeira et al., (2016) para a região do Noroeste Paulista (Figura 7), onde a curva de ET/ET₀ não apresentaram valores inferiores a 0,80 durante o estágio de máximo consumo hídrico da planta e ainda encontrando valores acima de 1,20 durante fase de crescimento ativo, entretanto no presente trabalho, os valor máximo encontrado para a fase de maior demanda hídrica, entre o dia 16/101/2016 e 04/06/2017, foi de 0,87 e o valor mínimo de 0,4.

Figura 7. Valores de ET_a/ET₀ para a cultura da cana-de-açúcar no sequeiro, para períodos de 16 dias, na região noroeste do Estado de São Paulo.



Silva et al. (2011), em estudos com a cana-de-açúcar no semiárido brasileiro utilizando métodos micrometeorológicos para determinar os coeficientes de cultura, encontraram valores médios de 0,65 para a fase I (Brotação e estabelecimento da cultura), fase II (estabelecimento e perfilhamento) valores variando de 0,65 até 1,0, fase III (Crescimento máximo) valores entre 1,0 e 1,15 e para a fase IV (Maturação) os valores decresceram de 1,0 até 0,85. Os valores encontrados durante o ciclo total da cultura também se mostraram distantes dos determinados neste trabalho para as duas áreas de estudo.

Entretanto, os valores de *Kc* encontrados neste trabalho foram semelhantes com os determinados por Zhang et al. (2015), em trabalho realizado no Hawaí, onde

usaram o modelo METRIC juntamente com dados micrometeorológicos obtidos através do sistema Covariância de Vórtices Turbulentos (Eddy Covariance), encontraram valores médios de K_c de 0,82 na fase III que compreende o crescimento máximo da cultura, na Figura 6 observa-se que para a data do 17/04/17 para a mesma fase a relação ET_a/ET₀ também apresentou valores de 0,87 para a área Andradina (Figura 6a) e 0,82 na área Ilha Solteira (Figura 6b), estes valores encontrados para as duas áreas devem-se a cultura encontrar-se na fase de crescimento máximo onde se tem uma exigência de um maior requerimento hídrico assim como descrito por Inman-Bamber (2004) e que para a data ocorreu dias de chuva na região com volumes capazes de suprir a quantidade de água requerida pela planta, na Figura 6 ainda é possível observar que a ET_a também alcançaram os valores máximos nestas datas, que segundo Allen et al. (1998), a ET_a alcança o valor da evapotranspiração máxima da cultura quando a cultura encontra-se em boas condições de campo e sem deficiência hídrica.

Os valores atuais de ET_a/ET₀ encontrados na fase inicial nas duas áreas foram de 0,15 (Figura 4), sendo abaixo dos determinados por (DOORENBOS e PRUITT, 1977) e recomendados no livro da FAO 56 (Allen et al., 1998), de modo geral os valores de coeficientes de cultivo encontrados neste trabalho foram inferiores aos encontrados em outros estudos como os realizados por Teixeira et al. (2016), no Noroeste Paulista usando o modelo SAFER, Inman-Bamber e McGlinchey (2003) na Austrália e na Suazilândia usando o método de balanço de energia Bowen Ratio e Win et al. (2014) com lisímetros. Entretanto os determinados por Zhang et al., (2015) para a fase inicial foi de 0,33, sendo menor que o valor recomendado pela FAO de 0,4; e considerando o ciclo total da cultura estes valores foram 16%, 34% e 16% inferiores aos recomendados pela FAO nos estágios de crescimento inicial, médio e final, respectivamente.

Uma possível explicação para os valores aparentemente baixos da relação ET_a/ET₀, talvez seja a inadequação do valor 1,0 usado na equação 4, já que, Teixeira et al. (2016), utilizaram o valor de 1,8 para determinar a relação ET_a/ET₀ por meio do modelo SAFER através de imagens obtidas do satélite MODIS para os anos 2011 e 2012. Contudo, os valores encontrados neste estudo representaram uma variação na curva similar a descrita por (DOORENBOS e PRUITT, 1977) segundo o crescimento da planta, isto também se observou nos valores de ET_a que aumentaram com o aumento dos valores de ET_a/ET₀, portanto este método da

estimativa da ET_a por meio do sensoriamento remoto usando o algoritmo SAFER não deixa de ser importante para o cálculo do consumo de água da cana-de-açúcar, todavia faz-se necessário a realização de estudos com métodos de calibração como é o caso do sistema Eddy Covariance, para assim comparar com os valores já estabelecidos e recomendados pelo livro 56 da FAO (Allen et al., 1998).

2.4 CONCLUSÃO

A simulação feita com os dados reais usados durante o ciclo produtivo da safra 2016-2017 teve um aumento significativo em quantidade de dias com deficiência hídrica, quando comparados com os valores da simulação recomendada, tendo um aumento de até um 75% entre os valores médios, sendo assim recomendável realizar a irrigação para esta área com um turno de rega fixo de 5 dias.

A lâmina média de projeto encontrada foi de 4,1 mm/dia, sendo maior que a lâmina maxima do sistema de irrigação (3,3 mm/dia), impossibilitando aplicação da lâmina necessaria para cultura.

A relação ET_a/ET₀ apresentou comportamento da curva similar ao citados na literatura, contudo os valores encontrados foram menores abaixo do recomendado para cana-de-açúcar, mas ainda assim, favoráveis para o estudo da necessidade de água da cana-de-açúcar, devendo-se continuar com estudos que calibrem o algoritmo SAFER para obtenção de melhores resultados.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. Atlas Irrigação - Uso da Água na Agricultura Irrigada. Brasília, DF: Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos, 2017. 85 p.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. FAO, Irrigation and Drainage Paper, 56. Rome, 1998. 300p.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; SMITH, M.; RAES, D.; WRIGHT, J. L. FAO-56 DUAL Crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 131, p. 1-13, 2005.

ASCOLI, A.; HERNANDEZ, F. B. T.; SENTELHAS, P. C.; TEIXEIRA, A. H. C.; AMENDOLA, E.C.; ASCOLI, R.T. Necessidade de irrigação na cultura da cana-de-açúcar em função da época de colheita. In: Inovagri International Meeting, 4; CONIRD – Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem, 26; SBS – Simpósio Brasileiro de Salinidade, 3., 2017, **Anais...** Fortaleza, 2017.

ASSENG, S.; HSIAO, T. C. Canopy CO₂ assimilation, energy balance, and water use efficiency of an alfalfa crop before and after cutting. **Field Crops Research**, v. 67, p. 191-206, 2000.

BERNARDO, S. Impacto Ambiental da irrigação no Brasil. **Engenharia na Agricultura – Série Irrigação e Drenagem**, Viçosa, v. 1, n. 1, p. 7, 1992.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. Manual de Irrigação. 8 a ed. Viçosa, MG: UFV, 2006. 625 p.

BISPO, R. C.; HERNANDEZ, F. B. T.; TEIXEIRA, A. H C. Balanço hídrico e estimativa do consumo relativo de água da cultura da cana-de-açúcar na região Noroeste Paulista. **Irriga**, Botucatu, Edição Especial, IRRIGA e INOVAGRI, v.1, n.1, p. 94-101, set. 2017.

CARVALHO, C. M.; AZEVEDO, H. M.; NETO, J. D.; FARIA, C. H. DE A.; SILVA, C. T. S.; FILHO, R. R. G. Rendimento de açúcar e álcool da cana-de-açúcar submetida a diferentes níveis de irrigação. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 4, n. 1, p. 72-77, jan/mar. 2009.

DANTAS NETO, J.; FIGUEREDO, J. L. C.; FARIA, C. H. DE A.; AZEVEDO, H. M. DE; AZEVEDO, C. A. V. DE. Resposta da cana-de-açúcar, primeira soca, a níveis de irrigação e adubação de cobertura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 2, p. 283-288, jan. 2006.

DOORENBOS, J.; KASSAN, A. H. FAO, Yield response to water. FAO. Irrigation and Drainage Paper, 33. Rome, 1979. 193p.

FARIA, C. H. A. **Desenvolvimento morfológico da cana-de-açúcar em regime irrigado e sequeiro na Zona da Mata paraibana**. Dissertação Mestrado, UFCG. Campina Grande, p. 74. 2001.

GAVA, G. J. DE C.; SILVA, M. DE A.; SILVA, R. C.; JERONIMO, E. M.; CRUZ, J. C. S.; KÖLLN, O. T. Produtividade de três cultivares de cana-de-açúcar sob manejos de sequeiro e irrigado por gotejamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 3, P. 250–255, mar. 2011.

HERNANDEZ, F. B. T.; TEIXEIRA, A. H. C; NEALE, C. M. U.; TAGHVAEIAN, S. Determining actual evapotranspiration on the large scale using agrometeorological and remote sensing data in the Northwest of the São Paulo State, Brazil. In: International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops, 7º, Geisenheim - Alemanha, Proceedings, p. 51, 2012.

HERNANDEZ, F.B.T.; SOUZA, S.A.V. de; ZOCOLER, J.L.; FRIZZONE, J.A. Simulação e efeito de veranicos em culturas desenvolvidas na região de Palmeira d'oeste, estado de São Paulo. Jaboticabal, **Engenharia Agrícola**, v. 23, n. 1, p. 21-30, 2003.

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

INMAN-BAMBER, N. G.; MCGLINCHEY M. G. Crop coefficients and water-use estimates for sugarcane based on long-term Bowen ratio energy balance measurements. **Field Crops Research**, v. 83, p. 125-138, Aug. 2003.

INMAN-BAMBER, N. G.; SMITH, D.M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field Crops Research**, v. 92, p. 185-202, Jun. 2005.

MATTIOLI, C. S.; FRIZZONE, J. A.; PAES, V. P. S.; FOLEGATTI, M. V. Aumento de produtividade da cultura da cana-de-açúcar sob irrigação complementar na região de Ribeirão Preto – SP. Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, Poços de Caldas, Anais. Lavras: UFLA/SBEA, v. 2, p. 16-18, 1998.

PEREIRA, A. R.; Angelocci, L. R.; Sentelhas, P. C. Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478 p.

PIRES, R. C. DE M.; ARRUDA, F. B.; SAKAI, E.; CALHEIROS, R. DE O.; BRUNINI, O. Agricultura Irrigada. **Tecnologia e Inovação Agropecuária**, v. 1, p. 98-111, jun. 2008.

SANTOS, G. O; HERNANDEZ, F. B. T.; ROSSETTI, J. C. Balanço hídrico como ferramenta ao planejamento agropecuário para a região de Marinópolis, noroeste do estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 4, n. 3, p. 142-149, 2010.

SANTOS. M. A.; LYRA, G. B.; LYRA, G. B.; SOUZA, J. L.; SEDIYAMA, G. C. Coeficiente da cultura no estádio inicial de desenvolvimento para cana-de-açúcar em diferentes datas de plantio na região de Tabuleiros Costeiros de Alagoas. **Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil – STAB**, v. 27, n. 6, p. 30-33, jan. 2009.

SHEN, Y.; ZHANG, Y.; KONDOH, A.; TANG, C.; CHEN, J.; XIAS, J.; SAKLLRA, Y.; LIU, C.; SUN, H. Seasonal variation of energy partitioning in irrigated lands. **Hydrological Processes**, v. 18, p. 2223-2234, 2004.

SILVA, M. A.; ARANTES, M. T.; RHEIN, A. F. DE L.; GAVA, G. J. C.; KOLLN, O. T. Potencial produtivo da cana-de-açúcar sob irrigação por gotejamento em função de variedades e ciclos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 3, p. 241–249, mar. 2014.

SILVA, M. DE A.; SANTOS, C. M.; VITORINO, H. S.; RHEIN, A. F. DE L. Pigmentos fotossintéticos e índice SPAD como descriptores de intensidade do estresse por deficiência hídrica em cana-de-açúcar. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 30, n. 1, p. 173-181, jan./feb. 2014.

SILVA, P. P.; SOARES, L.; COSTA, J. G.; VIANA, L. V.; ANDRADE, J. C. F.; GONÇALVES, E. R.; SANTOS, J. M.; BARBOSA, G. V. S.; NASCIMENTO, V. X.; TODAROE, A. R.; RIFFEL, A.; GROSSI-DE-SAF, M. F.; BARBOSA, M. H. P.; SANT'ANAC, A. E. G.; RAMALHO NETO, C. E. Path analysis for selection of drought tolerant sugarcane genotypes through physiological components. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v. 37, p. 11-19, 2012.

SILVA, T. G. F.; MOURA, M. S. B.; ZOLNIER, S.; JOSÉ M. SOARES, J. M.; VIEIRA, V. J. DE S.; JÚNIOR, W G. F. Requerimento hídrico e coeficiente de cultura da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 1, p. 64–71, nov. 2012.

TEIXEIRA, A. H. C.; HERNANDEZ, F. B. T.; LOPES, H. L. Application of Landsat images for quantifying the energy balance under conditions of fast land use changes in the semi-arid region of Brazil. SPIE Remote Sensing, Edinburgh. Proc. SPIE 8531, Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology, XIV, v. 8531. p. 1-10, 2012.

TEIXEIRA, A. H. C.; HERNANDEZ, F. B. T.; LOPES, H. L.; SHERER-WARREN, M.; BASSOI, L. H. Modelagem espacotemporal dos componentes dos balanços de energia e de água no Semiárido brasileiro. Documentos, 99, Campinas: EMBRAPA Monitoramento por Satélite. 2013. 32p.

TEIXEIRA, A. H. DE C. Determining regional actual evapotranspiration of irrigated crops and natural vegetation in the São Francisco river basin (Brazil) using remote sensing and Penman-Monteith equation. **Remote Sensing**, v. 2, p. 1287-1319, maio. 2010.

TEIXEIRA, A. H. DE C.; LEIVAS, J. F.; ANDRADE, R. G.; HERNANDEZ, F. B. T. Water productivity assessments with Landsat 8 images in the Nilo Coelho irrigation scheme. *Irriga*, Botucatu, edição especial, p.1-10, 2015a.

TEIXEIRA, A. H. DE C.; LEIVAS, J. F.; ANDRADE, R. G.; HERNANDEZ, F. B. T.; FRANCO, R. F. Modelling radiation and energy balances with Landsat 8 images under different thermohydrological conditions in the Brazilian semi-arid region. *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology*, 17, Toulouse. Anais...SPIE, 2015b.

TEIXEIRA, A. H. DE C.; LEIVAS, J. F.; RONQUIM, C. C.; VICTORIA, D. de C. Sugarcane Water Productivity Assessments in the São Paulo state, Brazil. **International Journal of Remote Sensing Applications**, v. 6, Jun. 2016.

TEIXEIRA, A. H. DE C.; PADOVANI, C. R.; ANDRADE, R. G.; LEIVAS, J. F.; VICTORIA, D. DE C.; GALDINO, S. Use of MODIS images to quantify the radiation and energy balances in the Brazilian Pantanal. **Remote Sensing**, v. 7, p. 14597-14619, Oct. 2015c.

TEODORO, I.; DANTAS NETO, J.; SOUZA, J. L.; LYRA, G. B.; BRITO, K. S.; SÁ, L. A.; SANTOS, M. A. L.; SARMENTO, P. L. V. S. Isoquantes de produtividade da cana-de-açúcar em função de níveis de irrigação e adubação nitrogenada. *Irriga*, Botucatu, v. 18, p. 387-401, jul/set. 2013.

THOMPSON, G. D.; BOYCE, J. P. Daily measurements of potential evapotranspiration from fully canopied sugarcane. **Agricultural Meteorology**, v. 4, p. 267-279, Jul. 1967.

TORRES NETTO, A.; CAMPOSTRINI, E.; OLIVEIRA, J. G.; BRESSAN-SMITH, R. E. Photosynthetic pigments, nitrogen, chlorophyll a fluorescence and SPAD-502 readings in coffee leaves. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 104, n. 2, p. 199-209, 2005.

UNESP - UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA. Acesso à base diária: Canal CLIMA. Ilha Solteira: UNESP - Faculdade de Engenharia - Departamento de Fitossanidade e Engenharia Rural e Solos - Área de Hidráulica e Irrigação, 2018. Disponível em: <<http://clima.feis.unesp.br>> Acesso em 9 de janeiro de 2018.

UNICAMP - UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS. Acesso à base de dados: Cepagri - Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura, 2018. Disponível em: <<http://www.cepagri.unicamp.br/>> Acesso em 9 de janeiro de 2018.

WIN, S.; ZAMORA, S. O. Determination of the water requirement and kc values of sugarcane at different crop growth stages by lysimetric method, **Sugar Tech**, v. 16, p. 286–294, Nov. 2014.

ZHANG, H.; ANDERSON, R.; G., WANG, D. Satellite-based crop coefficient and regional water use estimates for Hawaiian sugarcane, **Field crops research**, v. 180 p.143-154, Aug. 2015.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para realizar o manejo ou dimensionamento de sistemas de irrigação é fundamental o conhecimento da necessidade hídrica de uma cultura por meio do balanço hídrico, que é uma ferramenta importante para o manejo da agua, e assim saber a disponibilidade de agua presente no solo para garantir uma máxima produtividade das culturas agrícolas. Tudo isto é possível por meio da estimativa da evapotranspiração, ao quantificar a água necessária a ser reposta no solo para atender à necessidade da cana-de-açúcar, orientando ao produtor – irrigante, na escolha da lâmina de água a ser aplicada.

É também fundamental o bom entendimento dos valores de coeficientes de cultivo (Kc) e da evapotranspiração de referência (ETo) que são as informações básica para determinar a evapotranspiração da cultura e desta forma realizar um bom uso e conservação dos recursos hídricos na agricultura irrigada.

O uso de modelos como o SAFER combinados com o sensoriamento remoto são métodos práticos e eficazes para observar o uso da água da cultura a uma escala regional, portanto deve-se continuar realizando estudos junto com métodos micrometeorológicos para calibrar estes modelos a escala regional e assim determinar o consumo total de agua pelas culturas por meio do processamento de imagens.

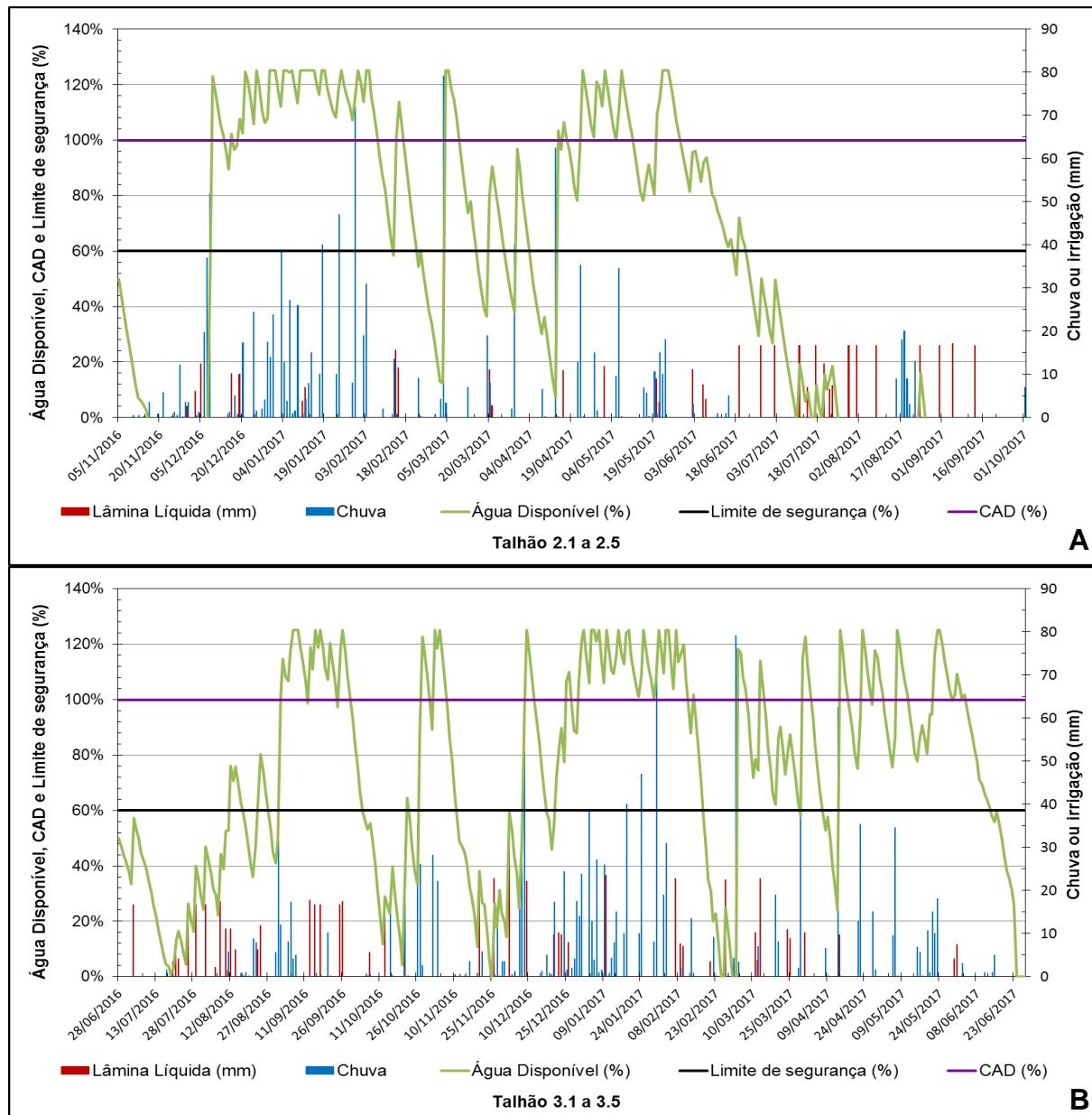
REFERÊNCIAS

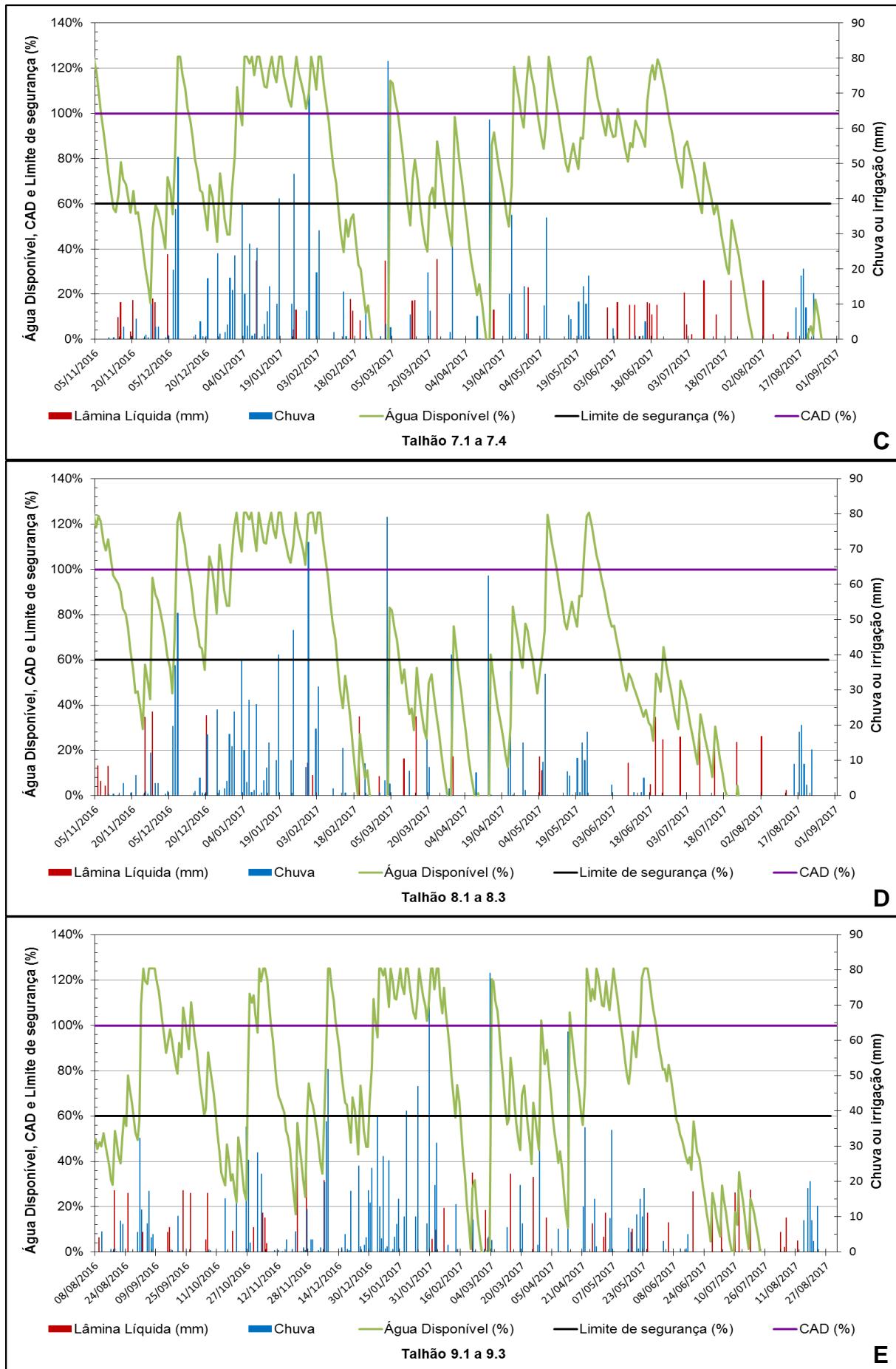
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. Roma: FAO Irrigation and Drainage, Paper 56, p.297, 1998.
- ANDERSON, R. G. WANG, D. TIRADO-CORBALÁ, R. ZHANG, H. AYARS, J. E. Divergence of actual and reference evapotranspiration observations for irrigated sugarcane with windy tropical conditions. **Hydrology and Earth System Sciences**. v. 19 p. 583-599, Jan. 2015.
- CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra Brasileira – cana-de-açúcar 2017/18 v. 4, n. 1, abril. 2017. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17_04_20_14_04_31_boletim_cana_portugues_-_1o_lev_-_17-18.pdf>. Acesso em 10 janeiro 2018.
- DOORENBOS, J.; KASSAN, A. H. FAO, Yield response to water. FAO. Irrigation and Drainage Paper, 33. Rome, 1979. 193p.
- FARIAS, C. H. A.; FERNANDES, P. D.; DANTAS NETO, J.; GHEYI, H. R. Eficiência no uso da água na cana-de-açúcar sob diferentes lâminas de irrigação e níveis de zinco no litoral paraibano. **Engenharia Agrícola**, v. 28, p. 494-506, 2008.
- INMAN-BAMBER, N. G.; SMITH, D. M. Water relations in sugarcane and response to water deficits, **Field Crops Research**, v. 92, p. 185-202, 2005.
- PACHECO, P.; ALONSO, N.; GUITIÉRREZ, A. A study of the sugar cane evapotranspiration in Cuba. In: Congress of the International Society of Sugar Cane Technologists, 18, Cuidad de La Habana, Society of Sugar Cane Technologists, p.380- 387, 1983.
- SILVA, M. A.; ARANTES, M. T.; RHEIN, A. F. DE L.; GAVA, G. J. C.; KOLLN, O. T. Potencial produtivo da cana-de-açúcar sob irrigação por gotejamento em função de variedades e ciclos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.18, n. 3, p. 241–249, mar. 2014.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. Fisiologia vegetal. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719 p.
- TEJERA, N. A.; RODÉS, R.; ORTEGA, E.; CAMPOS, R.; LLUCH, C. Comparative analysis of physiological characteristics and yield components in sugarcane cultivars.
- ÚNICA. União da agroindústria canavieira do estado de São Paulo. Levantamento d a Safra de cana-de-acúcar 2016/17, Disponível em: <<http://www.unicadata.com.br/historico-de-producao-moagem.php?idMn=32&tipoHistorico=4>>. Acesso em 10 janeiro 2018.

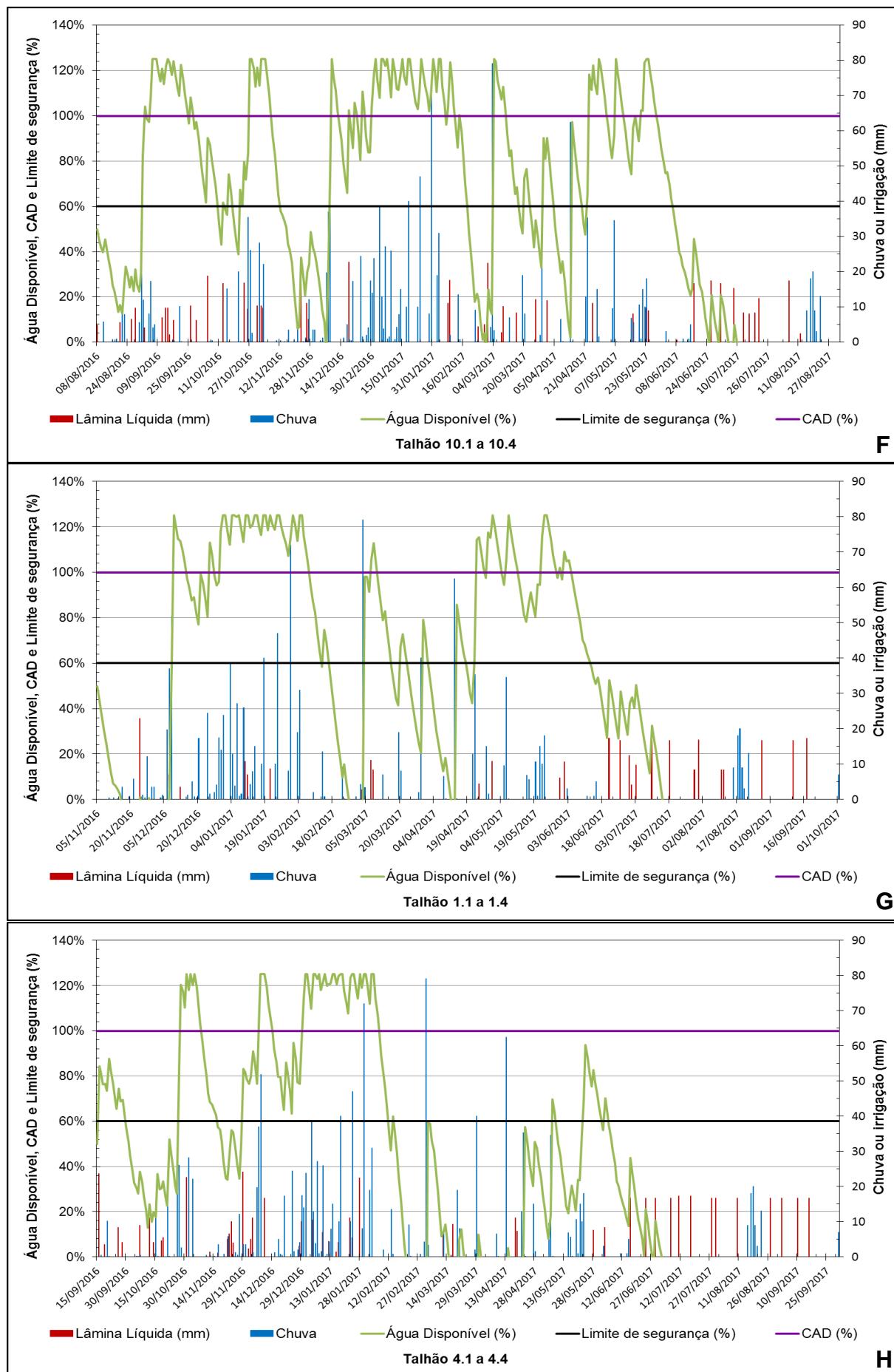
WIEDENFELD, B. Scheduling water application on drip irrigated sugarcane. **Agricultural Water Management**, v. 64, p.169– 181, 2004.

ANEXOS

Figura 8. Demonstração do manejo da irrigação realizado durante a safra 2016 – 2017 para cada talhão na área de estudo Andradina.







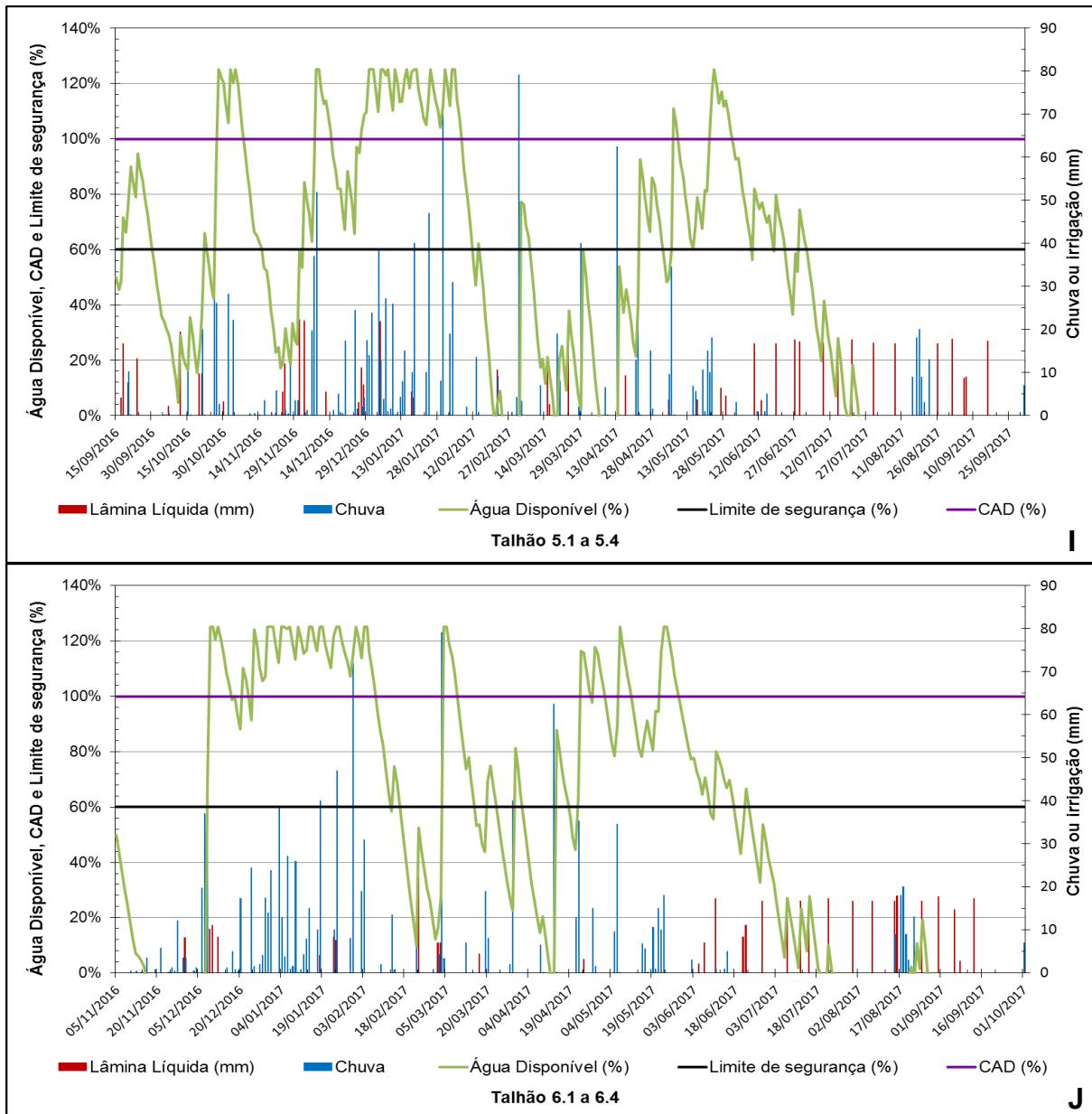


Figura 9. Demonstração do manejo da irrigação recomendado para a safra 2016 – 2017 para cada talhão na área de estudo Andradina.

