

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**

**DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE CULTIVO DA
CANA-DE-AÇÚCAR DE ANO**

ANA LAURA FIALHO DE ARAÚJO

DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
2018

DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE CULTIVO DA CANA-DE- AÇÚCAR DE ANO

ANA LAURA FIALHO DE ARAÚJO

Orientador: PROF. Dr. LUCIANO OLIVEIRA GEISENHOF
Coorientador: Dr. DANILTON LUIZ FLUMIGNAN

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal da Grande Dourados, como
parte das exigências para conclusão do curso de
Engenharia Agrícola.

DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

A663d Araujo, Ana Laura Fialho De

Determinação do coeficiente de cultivo da cana-de-açúcar de ano / Ana Laura Fialho De Araujo -- Dourados: UFGD, 2018.

50f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Luciano Oliveira

Geisenhoff Co-orientador:

Danilton Luiz Flumignan

TCC (Graduação em Engenharia Agrícola)-Universidade Federal da Grande Dourados

Inclui bibliografia

DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE CULTIVO DA CANA-DE-AÇÚCAR DE ANO

Por

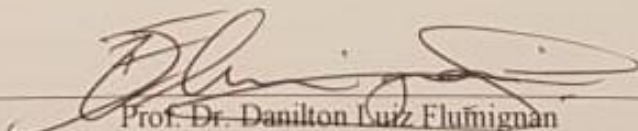
Ana Laura Fialho de Araújo

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de ENGENHEIRO AGRÍCOLA

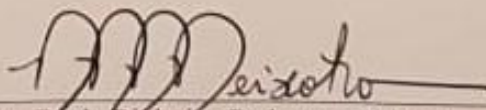
Aprovado em: 12 / Novembro / 2018



Prof. Dr. Luciano Oliveira Geisenhoff
Orientador – UFGD/FCA



Prof. Dr. Danilton Luiz Flumignan
Membro da Banca – Embrapa Agropecuária Oeste



Profa. Dra. Paula Pinheiro Padovese Peixoto
Membro da Banca – UFGD/FCA

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida.

A minha mãe, Susamar Costa Leal, por todo amor, apoio e compreensão durante as etapas da minha graduação.

Ao meu coorientador, Dr. Luiz Danilton Flumignan, por todo aprendizado que adquiri trabalhando ao seu lado na Embrapa Agropecuária Oeste.

Aos professores da Universidade Federal da Grande Dourados, Faculdade de Ciências Agrárias, pelos ensinamentos ao longo da graduação.

Aos funcionários da Embrapa Agropecuária Oeste, em especial a equipe da agrometeorologia, pelo suporte e dedicação na realização dos trabalhos.

A CNPq e FUNDECT pelo apoio financeiro.

Aos meus amigos que me acompanharam até aqui.

A Jaqueline Magalhães e sua família, pelo carinho e amparo.

E a todos, que mesmo com pequenos gestos, me ajudaram nessa conquista.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	vii
RESUMO.....	vii
ABSTRACT.....	ix
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1. Cana-de-açúcar.....	3
2.1.1. Cenário da cana-de-açúcar no Brasil.....	3
2.1.2 Morfologia da cana-de-açúcar.....	4
2.1.3 Exigências climáticas da cultura da cana-de-açúcar.....	5
2.2 Evapotranspiração.....	6
2.2.1 Determinação da evapotranspiração da cultura.....	7
2.3 Evaporação.....	8
2.3.1 Determinação da evaporação do solo.....	8
2.4 Transpiração.....	9
2.4.1 Determinação da transpiração.....	10
2.5 Determinação da evapotranspiração de referência.....	10
2.6 Determinação do coeficiente de cultivo.....	11
2.6.1 Importância da determinação do coeficiente de cultivo.....	12
2.7 Coeficiente de cultura basal e coeficiente de evaporação do solo.....	12
2.8 Índice de área foliar.....	13
3.1 Localização e condições meteorológicas.....	15
3.2 Solo e características do relevo.....	18
3.3 Estação agrometeorológica.....	18
3.4 Área experimental.....	19
3.5 Lisímetro de pesagem e medição da evapotranspiração da cultura.....	23
3.6 Determinação da evaporação.....	25

3.7 Determinação da transpiração	27
3.8 Determinação dos valores de K_c , K_e e K_{cb}	27
3.9 Determinação do índice de área foliar	28
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	29
5. CONCLUSÃO.....	36
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	37

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. Rizoma de um tolete de cana-de-açúcar.....	4
FIGURA 2. Colmo da cana-de-açúcar	5
GRÁFICO 1. Temperatura média (T), temperatura máxima (TM), temperatura mínima (Tm) e amplitude térmica mensal (ΔT) da região de Dourados, MS, no período de janeiro de 2001 a maio de 2016.	16
FIGURA 3. Área experimental cultivada com a cana-de-açúcar	21
FIGURA 4. Layout da disposição de variedades.....	20
FIGURA 5. Variedade analisada no lisímetro de pesagem.....	21
FIGURA 6. Layout do sistema de irrigação por gotejamento	22
FIGURA 7. Instalação do lisímetro.	23
FIGURA 8. Procedimento para coleta de dados.....	24
FIGURA 9. Componentes do microlisímetro.....	25
FIGURA 10. Extração das amostras de solo	26
GRÁFICO 2. Desenvolvimento foliar da cana-de-açúcar durante os meses de estudo.....	30
GRÁFICO 3. Análise da evapotranspiração da cultura (ET_c) e da evapotranspiração de referência (ET_0)	31
GRÁFICO 4. Coeficiente de cultivo (K_c) nos meses de abril a outubro.	32
GRÁFICO 5. Relação entre K_c e IAF	33
GRÁFICO 6. Análise da evaporação (E) e transpiração (T) nos meses de junho a outubro ...	34
GRÁFICO 7. Análise do coeficiente de evaporação (K_e) e do coeficiente de cultivo basal (K_{cb}) nos meses de junho a outubro.....	35

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. Valores da constante do numerador (C_n) e constante do denominador (C_d) em função do tempo de análise da evapotranspiração de referência (ET_0) e da radiação líquida horária (R_n).....	11
TABELA 2. Temperatura média (T), temperatura máxima (TM), temperatura mínima (Tm) e amplitude térmica mensal (ΔT) da região de Dourados, MS, no período de janeiro de 2001 a maio de 2016.	15
TABELA 3. Precipitação pluviométrica decendial média e esperada na região de Dourados, MS, para diferentes níveis de probabilidade, durante o período de janeiro de 1980 a dezembro de 2015.	17
TABELA 4. Equipamentos utilizados na estação agrometeorológica	19
TABELA 5: Valores do índice de área foliar (IAF), área foliar total (AFT), área foliar (AF) e altura da planta.....	29

Araújo, Ana Laura Fialho de. **Determinação do coeficiente de cultivo da cana-de-açúcar de ano**. 2018. 40p. Monografia (Graduação em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados – MS.

RESUMO

A cana-de-açúcar possui seu foco de produção na região sudeste e nordeste do Brasil, porém devido à crescente demanda por biocombustíveis e seu valor no mercado nacional e internacional, sua produção vem se expandindo pelo território brasileiro. Para garantir uma máxima produção, pareada ao uso racional e sustentável da água, é necessário o estudo da real demanda hídrica da cultura. Para isso, foi realizado esse trabalho, em condições de campo, na Embrapa Agropecuária Oeste – Dourados, MS, ao longo da safra 2018/19, com o objetivo de determinar o coeficiente de cultivo (K_c), coeficiente de evaporação (K_e) e coeficiente de cultivo basal (K_{cb}) para a cultura da cana-de-açúcar de ano. A evapotranspiração da cultura (ET_c) foi medida por um lisímetro de pesagem, onde foi cultivado a cana-de-açúcar em sua superfície e bordadura (área total de 0,55 ha). Para a determinação dos coeficientes simples e dual, foi necessário o uso da evapotranspiração de referência (ET_0), obtida por meio da equação de Penman-Monteith, com as variáveis coletadas na estação agrometeorológica da Embrapa Agropecuária Oeste. Microlisímetros foram instalados próximos ao lisímetro e usados para determinação da evaporação (E) e, por consequência, pela diferença entre a ET_c e E foi determinada a transpiração (T). Os valores dos coeficientes foram analisados juntamente com o índice de área foliar (IAF) da cultura. Os valores obtidos dos coeficientes foram: para a fase inicial, K_c de 0,7, K_e 0,4 e K_{cb} 0,2; ao passo que na fase de desenvolvimento estes valores foram, K_c de 1,0, K_e 0,3 e K_{cb} 0,7.

Palavras-chave: *Saccharum officinarum*; Lisímetro; Microlisímetro

ABSTRACT

Sugarcane has its production focus in the southeastern and northeastern region of Brazil, but due to the growing demand for biofuels and its value in the national and international market, its production has expanded throughout Brazil. To ensure maximum production, coupled with the rational and sustainable use of water, it is necessary to study the real water demand of the crop. For this purpose, this work was carried out under field conditions at Embrapa Agropecuária Oeste - Dourados, MS, during the 2018/19 harvest, in order to determine the crop coefficient (K_c), evaporation coefficient (K_e) and basal crop coefficient (K_{cb}) for year-old sugarcane. The crop evapotranspiration (ET_c) was measured by a weighing lysimeter, where sugarcane was grown on its surface and border (total area of 0.55 ha). For the determination of the single and dual coefficients, it was necessary to use the reference evapotranspiration (ET_0), obtained by means of the Penman-Monteith equation, with the variables collected at the agrometeorological station of Embrapa Agropecuária Oeste. Microlisimeters were installed near the lysimeter and used for determination of evaporation (E) and, consequently, the difference between ET_c and E , the transpiration (T) was determined. The values of the coefficients were analyzed together with the leaf area index (LAI) of the crop. The values obtained from the coefficients were: for the initial phase, K_c of 0.7, K_e 0.4 and K_{cb} 0.2; whereas at the development stage these values were, K_c of 1.0, K_e 0.3 and K_{cb} 0.7.

Keywords: *Saccharum officinarum*; Lysimeter; Microlithimeter

1. INTRODUÇÃO

Muitos são os fatores que interferem na produção agrícola, tais como a temperatura ambiente, índice de radiação solar, física e química do solo, nutrição, entre outros. Porém, o fator considerado de maior relevância para o desenvolvimento da cultura é a água disponível (PAIVA et al., 2005; FLEXAS et al., 2006).

O Brasil possui posição de destaque no ranking de países com maior quantidade de água disponível, ocupando o primeiro lugar, com um total de 5,661 bilhões de metros cúbicos de água. Apesar da grande disponibilidade hídrica, a distribuição da água não é regular, o que implica em regiões como o Norte, com densidade demográfica de 4,12 hab km² e concentração dos recursos hídricos de 68,5% e a região Sudeste, com 86,92 hab km² e concentração dos recursos hídricos de 6% apenas (IBGE/AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS, 2010).

A região Centro-Oeste, segundo dados do IBGE (2010), possui densidade demográfica de 8,75 hab km² e concentração dos recursos hídricos de 15,7%. Apesar de ser uma região com baixa densidade demográfica, o uso da água para irrigação vem se tornando cada vez mais presente, implicando na necessidade de um manejo racional e sustentável deste recurso.

A cana-de-açúcar é umas das culturas que vem ganhando destaque na produção do Centro-Oeste, devido a demanda no mercado nacional e internacional do etanol. A lei nº 13.567, de 26 de dezembro de 2017, pautada na política nacional dos biocombustíveis (PORTAL DA LEGISLAÇÃO – PLANALTO), promove o desenvolvimento tecnológico no uso dos recursos renováveis para geração de energia. Logo, há necessidade de maiores estudos referentes à cultura, para garantir uma máxima produtividade e uso sustentável dos recursos naturais para sua produção.

A cana-de-açúcar possui fácil adaptação em condições tropicais e subtropicais, com alta disponibilidade de água, radiação solar e nutrientes (TEJERA et al., 2007). Sua necessidade hídrica varia de 1.500 a 2.500 mm, que devem ser distribuídos de maneira uniforme durante todo o período de desenvolvimento vegetativo (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A AGRICULTURA E ALIMENTAÇÃO). Porém, estudos recentes mostram que o potencial máximo de desenvolvimento da cultura é atingido com um abastecimento de 1.200 a 1.300 mm de água (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 2018).

Para garantir uma máxima produtividade da cultura é necessário o conhecimento do consumo hídrico, ou seja, a quantificação da real necessidade hídrica da cultura ao longo da safra, para que assim seja feito o uso da água de maneira racional e sustentável. A determinação deste consumo hídrico pode ser feita por meio de lisímetros de pesagem, que segundo a FAO 56 (ALLEN et al., 1998), são tanques de aço carbono instalados a campo, com solo estruturado, onde a cultura semeada sobre os lisímetros deverá ser a mesma em sua bordadura. Para se quantificar o consumo hídrico, o tanque é apoiado em células de carga, as quais mensuram a variação de massa do lisímetro, aplicando cálculos de balanço hídrico.

Conhecendo a variação de massa do lisímetro, determina-se a evapotranspiração da cultura (ET_c), onde esta é o somatório da evaporação de água pelo solo e transpiração de água pela planta (PEREIRA et al., 2007). É necessário também o conhecimento da evapotranspiração de referência (ET_0), sendo característica de um gramado sem estresse hídrico de estação meteorológica, que segundo FAO 56 (ALLEN et al., 1998), é a evapotranspiração da cultura livre de doença, bem fertilizada, cultivada em extensas áreas, sem estresse hídrico e alcançando a máxima produtividade.

O coeficiente de cultivo (K_c) é então obtido pela razão entre ET_c e ET_0 , sendo usado posteriormente para dimensionamento da irrigação e manejo hídrico, além de estudos de zoneamento de risco climático. O K_c reveste-se de grande importância para a preservação de recursos hídricos e aumento da produtividade, por isso sua determinação por meio da divisão da ET_c , obtida com os lisímetros de pesagem, pela ET_0 , obtida com dados de estações meteorológicas pelo método Penman-Monteith, é de grande valia (ALLEN et al., 1998).

Para melhor entendimento sobre a dinâmica da água no sistema, o K_c pode ser dividido em coeficiente de cultivo basal (K_{cb}) e coeficiente de evaporação (K_e). O K_{cb} é determinado pela razão entre a transpiração da planta (T) e a ET_0 , já o K_e é obtido pela razão entre evaporação do solo (E) e a ET_0 . Tais coeficientes representam as taxas de transpiração de água pela planta e evaporação de água pelo solo no sistema, de acordo com a demanda exigida pela atmosfera (ALLEN et al., 1998).

O objetivo deste trabalho é, portanto, a determinação das taxas de ET_c , E e T da cana-de-açúcar de ano, cultivada na região de Dourados-MS, e pela razão com a ET_0 , determinar os valores de K_c , K_e e K_{cb} da cultura durante a safra de 2018/19. Em paralelo com a análise dos coeficientes, também objetivou-se analisar o crescimento da cultura irrigada, com o objetivo de se comparar e modelar a curva do K_c com parâmetros de crescimento.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Cana-de-açúcar

2.1.1. Cenário da cana-de-açúcar no Brasil

O cultivo da cana-de-açúcar teve início na época colonial, com os tradicionais engenhos de açúcar instalados na região Nordeste do país. Sua expansão mais marcante para outras regiões do Brasil ocorreu principalmente durante os anos de 1975 e 1979, com o programa federal denominado Proálcool, que foi uma alternativa criada para solucionar a questão da crise internacional do petróleo do início da década de 1970. O Sudeste, em particular o estado de São Paulo, passou a ser referência no cultivo da cana-de-açúcar com o objetivo da geração do etanol (MAPA, 2007).

A monocultura da cana-de-açúcar se concentrou no estado de São Paulo e a partir de incentivos governamentais, tais como o instituto da Açúcar e do Álcool (IAA), pode se desenvolver e prosperar, garantindo a posição de líder mundial do setor agroindustrial da cana-de-açúcar até meados de 1980. Contudo, o final dos anos 80 foi marcado com a crise do neoliberalismo, marcando o fim dos subsídios governamentais para os programas do Proálcool, que teve seu fim oficializado em 1991. (CASTRO et al., 2010)

A região Centro-Oeste não apresentou crescimento do setor sucroalcooleiro durante o período do Proálcool, devido ao fato da região estar sendo alvo dos prolongamentos da fronteira agrícola, principalmente com o cultivo de grãos e criação de gado. O cultivo da cana-de-açúcar começou a se tornar notável no Centro-Oeste somente no final da década de 1990, com a necessidade da diversificação da matriz energética brasileira e consequentemente com o incentivo aos biocombustíveis (CASTRO et al., 2010).

Mesmo com a implantação tardia da cana-de-açúcar nas regiões centrais do Brasil, estas possuem hoje posições de destaque na produção nacional. A área cultivada destinada a produção sucroalcooleira na safra 2014/15 foi de 9.004,5 mil hectares, as regiões de São Paulo, Goiás, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, Paraná, Alagoas e Pernambuco representaram, respectivamente, 52; 9,5; 8,9; 7,4; 7,1; 4,3 e 2,9% da produção nacional. A região Centro-Sul é atualmente responsável por 92,5% do total produzido no país, principalmente em São Paulo, com 49,4%, Goiás com 14,6% e Mato Grosso do Sul com 8,5% da produção (CONAB, 2017).

2.1.2 Morfologia da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) possui parte aérea formada por colmos, folhas, inflorescências (conjunto de flores arranjadas em uma haste) e frutos, já a parte subterrânea é formada por raízes e rizomas, que são caules subterrâneos, espessados entre si, ricos em reservas e providos de nós e entrenós) (MOZAMBANI et al., 2006).

As raízes se apresentam na forma fasciculada ou em cabeleira (Figura 1), cuja característica principal é a de que todas as raízes partem de um mesmo ponto e possuem diâmetros semelhantes, não havendo uma raiz principal na planta. 85% das raízes se encontram nos primeiros 50 cm de profundidade, e cerca de 60% a 20-30 cm de profundidade, podendo haver variações de acordo com cada variedade da cultura (MOZAMBANI et al., 2006).

Os rizomas da cana-de-açúcar são constituídos de gemas, nós e entrenós. As gemas por sua vez são responsáveis pela formação dos perfilhos na touceira. Com a soca ou a ressoca irão se originar as novas touceiras a partir dos rizomas. Por fim, o colmo é representado por nós bem marcados e entrenós distintos, permanecendo acima do nível do solo (Figura 2). O colmo é responsável pela sustentação das folhas e das panículas, podendo este ser ereto, semiereto ou decumbente dependendo da idade da planta (MOZAMBANI et al., 2006).



FIGURA 1. Rizoma de um tolete de cana-de-açúcar (Ilustração: Botânica para estudantes).

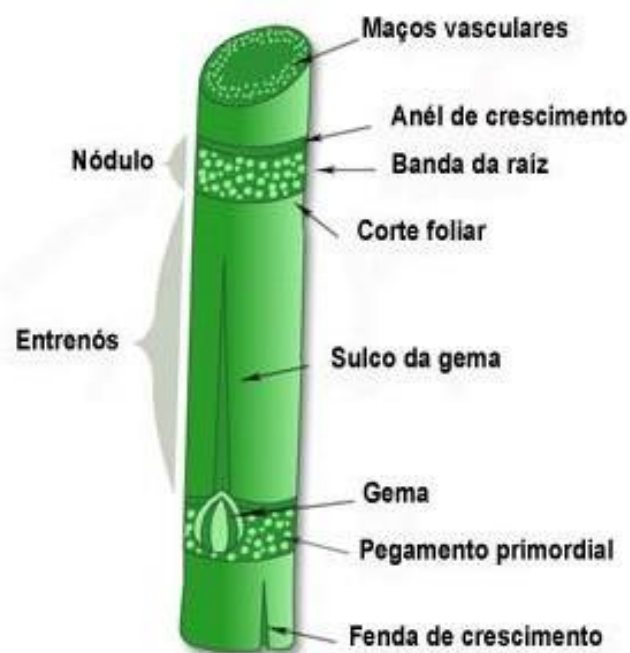


FIGURA 2. Colmo da cana-de-açúcar (Ilustração: Agricultura em foco).

2.1.3 Exigências climáticas da cultura da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar vem se expandindo pelo território nacional, porém para se garantir a máxima produtividade da cultura é necessário o correto manejo, no que se refere principalmente a distribuição pluviométrica da região. Uma baixa disponibilidade hídrica para a cultura implica em resultados negativos na produção e na qualidade dos canaviais (WIEDENFELD & ENCISO, 2008).

Mesmo a água sendo um fator limitante na produção, é importante analisar as condições ambientais em sua totalidade. A quantidade de água disponível, juntamente com a adubação, material genético utilizado, idade do corte, tipo de solo e clima são de suma importância para o desenvolvimento ideal da cultura (DANTAS NETO et al., 2006).

A exigência hídrica da cultura da cana-de-açúcar varia de acordo com seu estágio vegetativo. Nos estágios iniciais de desenvolvimento, a necessidade de se satisfazer a exigência hídrica se mostra maior, uma vez que sua ausência implica em restrições nos processos de divisão e alongamento celular, prejudicando assim o acúmulo da matéria seca, crescimento da cultura e aumento do índice de área foliar (INMAN-BAMBER & SMITH, 2005).

Segundo a Agência Embrapa de Tecnologia e Informação, a temperatura ideal do solo para o brotamento dos toletes é de 32 a 38 °C, e a temperatura ideal média durante o dia para o desenvolvimento vigoroso da cultura é de 22 a 30 °C. Caso a cultura seja exposta a temperaturas abaixo de 20 °C, seu desenvolvimento vegetativo será prejudicado. A umidade do solo deve ser igualmente distribuída durante o desenvolvimento vegetativo da cultura. Segundo a Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação (FAO), a necessidade hídrica da cana-de-açúcar varia entre 1.500 a 2.500 mm.

A maturação se caracteriza por ser uma fase onde o crescimento vegetativo cessa e acontece o acúmulo de sacarose nos colmos, com isso, entende-se que as exigências climáticas devem ser diferentes das da fase vegetativa. Segundo a Agência Embrapa de Tecnologia e Informação, a faixa de temperatura ideal para a maturação é de 10 a 20 °C, com ausência de chuvas e irrigação.

Outro fator importante para o desenvolvimento da cultura é o índice de radiação solar incidente, fonte energética necessária para a conversão de CO₂ em carbono orgânico. A cana-de-açúcar do gênero *Saccharum spp* possui metabolismo C4, ou seja, é considerada com alta eficiência para a conversão da energia radiante em energia química, alcançando uma taxa fotossintética de até 100 mg de CO₂ por dm² de área foliar por hora. Com isso, quanto maior sua área foliar, maior será seu potencial fotossintético (CARNEIRO, 2015).

2.2 Evapotranspiração

Segundo Allen et al. (1998) a evapotranspiração é a combinação de dois processos de perda de água, sendo um deles a evaporação de água pelo solo e outro pela transpiração de água através da planta. Os dois processos ocorrem simultaneamente, e não existe maneira simples de distingui-los, contudo, suas mudanças ao longo do desenvolvimento da cultura são significativas.

A evaporação no solo ocorre principalmente devido a radiação solar incidente, a medida que a cultura se desenvolve e sua área foliar aumenta, o solo exposto diminui e consequentemente a taxa de evaporação decresce e a transpiração pela planta aumenta. Com o desenvolvimento máximo da área foliar, a evapotranspiração é representada 90% pela transpiração, já nas fases iniciais e finais do cultivo, a evapotranspiração é representada por praticamente 100% de evaporação (ALLEN et al., 1998).

Os principais fatores que afetam a evapotranspiração são a radiação solar, temperatura do ar, umidade e velocidade do vento. Além das condições ambientais, as características da cultura também afetam as taxas de evapotranspiração, como o tipo de metabolismo, variedade, capacidade de reflexão, rugosidade, fase de desenvolvimento e manejo (ALLEN et al., 1998).

A evapotranspiração de referência (ET_0) segundo Allen et al. (1998) seria um conceito para estudar a demanda de evaporação da atmosfera, independentemente do tipo, desenvolvimento e manejo da cultura. Para isso, deve ser usada uma cultura livre de pragas e déficit hídrico. Normalmente, em regiões tropicais, é utilizado a grama batatais (*Paspalum notatum*) como cultura hipotética de referência.

A evapotranspiração da cultura (ET_c) de acordo com Allen et al. (1998) é a evapotranspiração de uma cultura qualquer, livre de doenças, bem fertilizada, sem déficit hídrico e com alta produtividade. Segundo Silva et al. (2006), o conhecimento da evapotranspiração da cultura é de suma importância para se outorgar, dimensionar e manejar o sistema de irrigação de uma cultura.

2.2.1 Determinação da evapotranspiração da cultura

Existem diversos métodos para a determinação da evapotranspiração de uma cultura, contudo, o método direto mais utilizado é o lisimétrico, o qual utiliza lisímetros para a determinação da variação de massa ao longo da safra (REICHADT & TIMM, 2004). Segundo Silva (1998) existem dois principais grupos de lisímetros, os pesáveis e os não pesáveis. O primeiro grupo diz respeito aos lisímetros de pesagem contínua ou intermitente, já o segundo grupo se refere aos lisímetros de drenagem e de lençol freático constante.

De acordo com Farahani et al. (2007) a lisimetria de pesagem é a melhor técnica para a determinação da evapotranspiração. Estes lisímetros são constituídos por tanques preenchidos com solo estruturado em sua condição natural e semeado com a mesma cultura em sua bordadura. Os tanques são apoiados em células de carga, responsáveis pela determinação da variação de massa do sistema (ABOUKHALED; ALFARO e SMITH, 1982, FLUMIGNAN, 2011).

Sendo o lisímetro de pesagem um bloco isolado hidrológicamente, seu balanço hídrico se baseia na equação (1):

$$P + I \pm ES = ET + D \pm \Delta A \quad (1)$$

onde P é a precipitação, I a irrigação, ES o escoamento superficial, ET a evapotranspiração, D a drenagem e ΔA a variação de armazenagem de água, sendo todas as variáveis dadas em milímetros. Os lisímetros de pesagem, em sua maioria, são construídos com a borda superior ligeiramente elevada, com isso o escoamento superficial é anulado da equação (ABOUKHALED; ALFARO e SMITH, 1982, FLUMIGNAN, 2011).

2.3 Evaporação

Evaporação é o processo onde a água líquida é convertida para água em vapor e removida da superfície do solo. Para que tal processo ocorra, é necessário energia da radiação solar e da temperatura do ar ambiente, além da energia, a força que impulsiona tal processo é devido a diferença de pressão entre o vapor de água e a umidade ambiente. (ALLEN et al., 1998).

A medida que a evaporação ocorre, o ar ao seu redor se torna gradativamente saturado, o processo de transferência irá diminuir até cessar a medida que a superfície do solo e o ar ambiente se encontrem em equilíbrio. (ALLEN et al., 1998).

De acordo com Allen et al. (1998), outros fatores influenciam a evaporação na agricultura, tais como o desenvolvimento da cultura. Conforme a cultura aumenta sua área foliar, esta irá produzir sombra no solo, impedindo que a radiação solar atinja diretamente o mesmo, causando a diminuição da taxa de evaporação. Entende-se, portanto, que a cobertura do solo e a taxa de evaporação são inversamente proporcionais.

Na agricultura, as fases de desenvolvimento da cultura em que se observa maiores taxas de evaporação da água do solo são as de implantação e preparo da lavoura, onde o solo se encontra mais exposto às condições meteorológicas. Na fase de germinação, a perda excessiva de água por evaporação pode causar prejuízos para o desenvolvimento da cultura, uma vez que diminui a quantidade de água disponível (QUAGLIA, 2005; REZENDE, 2016).

2.3.1 Determinação da evaporação do solo

As principais propriedades responsáveis pela determinação da densidade do fluxo de água no solo é a condutividade hidráulica, que mede a capacidade do solo na condução de água, e a taxa de retenção de água no solo, característica que permite analisar a capacidade do solo em armazenar água (KLUTE & DIRKSEN, 1986). Com isso, o estudo da dinâmica de

água no solo se torna de suma importância no manejo agrícola, uma vez que a quantidade de água disponível para a cultura dependerá da capacidade de condução hidráulica e da retenção de água pelo solo.

A condutividade hidráulica possui seu valor máximo em condições de solo saturado e é expresso em função da umidade e do potencial matricial. Um dos métodos utilizados para a determinação da evaporação é baseado em experimentos de drenagem interna, com o método do perfil instantâneo (MPI), que se baseia na análise das equações de Richards em perfis com fluxo transcendentais durante a drenagem vertical, que ocorre após uma situação de solo saturado (HILLEL, 1972; HURTADO, 2003).

Contudo, segundo Baker et al. (1974) e Paige & Hillel (1993) o método MPI possui limitações no que tange a presença de água subterrânea próxima a superfície, em perfis de solos heterogêneos. A água próxima a superfície dificulta o processo de drenagem vertical, já que parcelas de solos menos permeáveis favorece o fluxo lateral de água.

A lisimetria pode ser usada para a determinação da evaporação de água do solo sem a interferência da drenagem natural do solo. Em condições de solo nu, a variação de massa do lisímetro será dada exclusivamente pela taxa de evaporação do solo. A medida que a cultura se desenvolve, a variação de massa será representada pela evapotranspiração, de modo que para a análise separada da evaporação, faz-se necessário o uso do método dos microlisímetros (WALKER, 1983; FLUMIGNAN 2008; REZENDE 2016).

Microlisímetros são pequenos tubos, preenchidos por solo estruturado do campo experimental, com a parte inferior vedada para evitar a drenagem e instalados no nível do solo. A verificação da evaporação ocorre por meio de pesagens periódicas, em momentos de ausência de chuva e irrigação, onde se analisa a diferença de massa da amostra (ALLEN et al., 1998; FLUMIGNAN, 2008; REZENDE, 2016).

2.4 Transpiração

A transpiração consiste no processo de vaporização da água contida nos tecidos da planta. A água das plantas é liberada para o ambiente através dos estômatos, que são pequenas aberturas na superfície da planta, por onde passam gases e vapor d'água. A água do solo é captada pela raiz, através da diferença de potencial entre a planta e o meio, e transportada através dos espaços intracelulares (ALLEN et al., 1998).

Assim como a evaporação, a transpiração depende de fatores ambientais, tais como a radiação solar, umidade da atmosfera e solo, temperatura do ar e velocidade do vento. A condutividade hidráulica do solo influencia na taxa de transpiração da planta, haja vista que quanto maior a capacidade do fluxo de água do solo para as raízes, maior será a quantidade de água intracelular na cultura (ALLEN et al., 1998; HURTADO 2003).

Segundo Allen et al. (1998), a fase de desenvolvimento da cultura, juntamente com o tipo da variável, também influencia na taxa de transpiração. Culturas em fase inicial e final de desenvolvimento possuem pouca área foliar para a transpiração, já em fase intermediária, com máximo desenvolvimento foliar, possuem a transpiração como principal fonte de perda de água para o ambiente (ALLEN et al., 1998).

2.4.1 Determinação da transpiração

A determinação da transpiração é de suma importância para estudos relacionados ao balanço hídrico, estresse hídrico da cultura, componentes da evapotranspiração, uso racional da água na agricultura e processos fisiológicos no geral (FLUMIGNAN, 2008).

A quantificação da transpiração pode ser feita pelo método da medição do fluxo de seiva, o qual é de grande valia para se identificar culturas resistentes ao estresse hídrico (BOEHRIGER, 2010). Modelos matemáticos e o uso da lisimetria também tornam possível a determinação da taxa de transpiração (FLUMIGNAN, 2008).

A determinação da evapotranspiração com o uso de lisímetros de pesagem, juntamente com a determinação da evaporação utilizando microlisímetros, permite a quantificação da transpiração por diferença, por meio da equação (2):

$$T = ET - E \quad (2)$$

Onde T é a transpiração da planta (mm.dia⁻¹), ET a evapotranspiração (mm.dia⁻¹) e E a evaporação do solo (mm.dia⁻¹).

2.5 Determinação da evapotranspiração de referência

Os únicos fatores que afetam a evapotranspiração de referência (ET₀) são os parâmetros climáticos. ET₀ expressa o poder evaporante da atmosfera local em um momento específico, não considerando as características da cultura e do solo. A forma recomendada para o seu cálculo é através da equação de Penman-Monteith (3):

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{C_n}{T + 273} u(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + C_d u)} \quad (3)$$

Onde ET_0 é a evapotranspiração de referência estimada pelo método Penman-Monteith na escala diária (mm.dia^{-1}) ou horária (mm.hora^{-1}); Δ é a declividade da curva de pressão de vapor da água à temperatura do ar ($\text{kPa.}^\circ\text{C}^{-1}$); R_n é a radiação líquida na superfície ($\text{MJ.m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ou $\text{MJ.m}^{-2} \text{ hora}^{-1}$); G é o fluxo de calor no solo ($\text{MJ.m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ou $\text{MJ.m}^{-2} \text{ hora}^{-1}$); γ é a constante psicrométrica ($\text{kPa.}^\circ\text{C}^{-1}$); C_n é a constante do numerador que varia com o tempo de análise (TABELA 1); T é a temperatura do ar medida a 2 m de altura ($^\circ\text{C}$); u é a velocidade do vento medida a 2 m de altura (m s^{-1}); e_s é a tensão de saturação de vapor (kPa); e_a é a tensão parcial de vapor (kPa); C_d é a constante do denominador que varia com o tempo de análise (TABELA 1) (FLUMIGNAN, 2008; ALLEN et al., 1998).

TABELA 1. Valores da constante do numerador (C_n) e constante do denominador (C_d) para utilização na eq. (3) em função do tempo de análise da evapotranspiração de referência (ET_0) e da radiação líquida horária (R_n)

Tempo de análise da ET_0 e R_n	C_n	C_d
Diário	900	0,34
Horário com $R_n > 0$	37	0,24
Horário com $R_n \leq 0$	37	0,96

2.6 Determinação do coeficiente de cultivo

Segundo Allen et al. (1998), o coeficiente de cultura (K_c) é representado pela razão entre a ET_c e ET_0 , podendo ser descrito de acordo com a equação (4):

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_0} \quad (4)$$

Onde K_c é o coeficiente de cultivo (adimensional), ET_c a evapotranspiração da cultura (mm.dia^{-1}) e ET_0 a evapotranspiração de referência (mm.dia^{-1}).

O K_c representa a integração dos efeitos de quatro características primárias que distinguem a cultura analisada da cultura de referência, normalmente representada pela grama batatais (ALLEN et al., 1998).

As características são: Altura da cultura, que influencia na resistência aerodinâmica e na transferência de vapor da cultura para a atmosfera; Albedo, que interfere na radiação líquida da superfície, onde esta é a fonte primária da troca de energia para o processo de evaporação; Resistência do dossel, sendo esta a resistência da cultura afetada pela área foliar,

idade da folha e grau de controle dos estômatos, a resistência do dossel influencia portanto a resistência da superfície foliar; Evaporação do solo, especialmente do solo nu (ALLEN et al., 1998).

O K_c varia de acordo com a cultura e possui diferentes valores ao longo do ciclo de desenvolvimento. Durante as fases iniciais e finais, onde a exposição do solo é maior do que a cobertura vegetal, o K_c possui valores menores. No entanto, na fase intermediária, onde a cultura possui seu máximo desenvolvimento foliar, minimizando ao máximo a exposição do solo às radiações solares, seu valor é o maior encontrado durante todo o ciclo (ALLEN et al., 1998; REZENDE, 2016).

2.6.1 Importância da determinação do coeficiente de cultivo

Conhecer os fenômenos envolvendo a evapotranspiração é essencial para realizar um manejo de irrigação de maneira racional. Além disso, seu conhecimento auxilia no zoneamento agrícola, previsão de melhores épocas para o plantio e estudos hidrológicos no geral (FLUMIGNAN, 2008).

O K_c possui papel fundamental para o uso racional da água na agricultura, relacionado ao manejo correto da irrigação e estudos do balanço hídrico. Portanto, sua determinação a partir da ET_c , obtida nos lisímetros de pesagem, e da ET_0 , obtida com a equação de Penman-Monteith, é de grande valia (REZENDE, 2016).

Em regiões onde a cultura corre o risco de sofrer estresse hídrico, a irrigação possibilitará a obtenção de maiores produtividades com a oferta de água em momentos críticos e diminuirá a má distribuição espacial da água no solo. Todavia, para que haja maior rendimento na produção é necessário o conhecimento das necessidades hídricas da cultura, para que se possa oferecer à cultura a quantidade exata de água para seus processos metabólicos e fisiológicos (AZEVEDO, 2003; BEZERRA, 2010).

2.7 Coeficiente de cultura basal e coeficiente de evaporação do solo

O coeficiente de cultivo dual é composto pelos efeitos da transpiração de água pela planta e evaporação de água pelo solo, representados respectivamente pelo coeficiente de cultura basal (K_{cb}) e coeficiente de evaporação (K_e) (ALLEN et al., 1998).

Segundo Allen et al. (1998) e Flumignan (2008), o K_{cb} é determinado pela razão entre ET_c e ET_0 , porém em condições onde o solo se encontra sem umidade excessiva, fazendo com que a perda de água no sistema ocorra em sua maioria pela transpiração da planta. A determinação do K_e , segue o mesmo princípio do K_{cb} , porém seu valor de maior relevância se dá no momento em que o solo se encontra mais exposto as condições ambientais, ou seja, no momento em que a planta possui pequena área foliar e a perda de água no sistema ocorra principalmente pela evaporação do solo.

O coeficiente de cultivo dual pode ser representado pela seguinte equação (5):

$$K_c = \frac{E+T}{ET_0} \quad (5)$$

Onde K_c é o coeficiente de cultivo simples (adimensional), E a evaporação (mm.dia^{-1}), T a transpiração (mm.dia^{-1}) e ET_0 (mm.dia^{-1}).

O manejo do coeficiente dual possui uma maior complexidade quando comparado com o coeficiente de cultivo simples, devido a necessidade da análise individual dos efeitos de transpiração e evaporação, com isso, seu uso requer práticas mais onerosas de manejos, sendo usada somente com a necessidade de uma análise precisa das taxas de evaporação e transpiração no K_c (ALLEN et al., 1998; FLUMIGNAN 2008; REZENDE 2016).

2.8 Índice de área foliar

O estudo do desenvolvimento da área foliar de uma cultura permite correlacioná-la com seu potencial produtivo (OLIVEIRA, 2007). Segundo Hermann & Câmara (1999), a folha é a estrutura responsável pela produção de grande parte dos carboidratos necessários ao crescimento e desenvolvimento da cultura.

Fatores ambientais, tais como a temperatura e déficit hídrico causam a diminuição da área foliar, uma vez que aceleram o processo de senescência das folhas verdes, prejudicando a produtividade final (INMAM-BAMBER, 2004; OLIVEIRA, 2007).

Especificamente com relação a cultura da cana-de-açúcar, Leme et al. (1984) relatam que o índice de área foliar (IAF) é fundamental para a avaliação final da cultura, sendo que os maiores valores encontrados do IAF durante o ciclo de desenvolvimento estariam relacionados com a produção mais eficiente de colmos. Com isso, o conhecimento da dinâmica do IAF, juntamente com a arquitetura da folha, poderá prever um melhor rendimento final da cultura.

Segundo Machado et al. (1982) o valor máximo ideal do IAF é em torno de 4,0, valor suficiente para interceptar aproximadamente 95% da radiação solar incidente. Terauchi & Matsuok (2000) afirmam que as características ótimas para as cultivares da cana-de-açúcar estão relacionadas com o desenvolvimento na fase inicial, onde a expansão da área foliar acarreta em um aumento no coeficiente de cultivo, impulsionado pelo aumento das taxas de transpiração.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização e condições meteorológicas

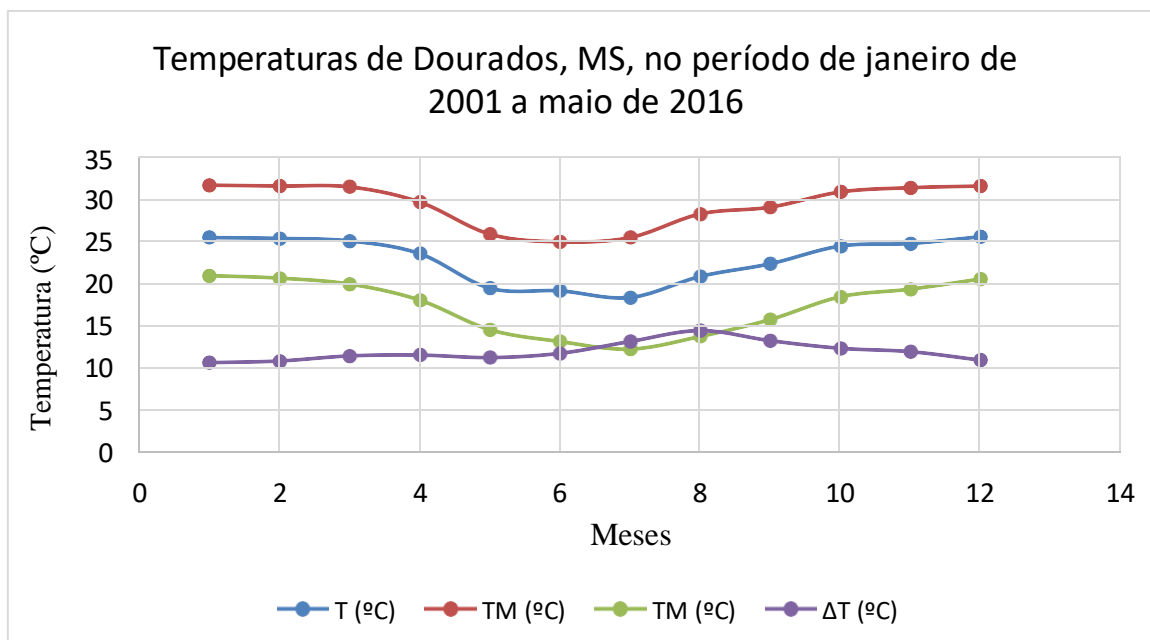
O experimento foi realizado na área experimental da Embrapa Agropecuária Oeste, localizada no município de Dourados, Mato Grosso do Sul, no centro-oeste brasileiro e no sul do Mato Grosso do Sul, possuindo clima tropical monçônico (KOTTEK et al., 2006). Com relação a temperatura média da região, segundo Fietz, Fisch, Comunello & Flumignan (2017), Dourados pode ser dividida em dois períodos: O primeiro com médias acima de 20°C (agosto a abril) e o segundo, abaixo de 20°C (maio a julho). As menores temperaturas ocorrem entre os meses de junho e julho devido às frentes frias que penetram na região. Já as maiores temperaturas predominam nos meses de janeiro e dezembro.

TABELA 2. Temperatura média (T), temperatura máxima (TM), temperatura mínima (Tm) e amplitude térmica mensal (ΔT) da região de Dourados, MS, no período de janeiro de 2001 a maio de 2016.

Mês	Jan (1)	Fev (2)	Mar (3)	Abr (4)	Mai (5)	Jun (6)	Jul (7)	Ago (8)	Set (9)	Out (10)	Nov (11)	Dez (12)
T (°C)	25,5	25,4	25,1	23,6	19,5	19,2	18,4	20,9	22,4	24,5	24,8	25,6
TM (°C)	31,7	31,6	31,5	29,7	25,9	25	25,5	28,3	29,1	30,9	31,4	31,6
TM (°C)	21	20,7	20	18,1	14,6	13,2	12,3	13,8	15,8	18,5	19,4	20,6
ΔT (°C)	10,7	10,9	11,5	11,6	11,3	11,8	13,2	14,5	13,3	12,4	12	11

Fonte: Documentos 138. O clima da região de Dourados, MS

GRÁFICO 1. Temperatura média (T), temperatura máxima (TM), temperatura mínima (Tm) e amplitude térmica mensal (ΔT) da região de Dourados, MS, no período de janeiro de 2001 a maio de 2016.



As médias da umidade relativa do ar atingem os menores valores no período de inverno (agosto e setembro), os maiores valores ocorrem no verão e outono, com máximas nos meses de janeiro, fevereiro e maio. Com relação à insolação e fotoperíodo, foi analisado pouca variação dos valores absolutos ao longo do ano na região de Dourados, MS (FIETZ, FISCH, COMUNELLO & FLUMIGNAN, 2017).

Sobre a radiação solar, Dourados apresenta valores mínimos em junho, no início do inverno, com valores crescentes até o solstício de verão em dezembro. Em seguida, os valores decrescem gradativamente até o período de inverno. Com relação ao vento na região, à 2 metros de altura, este possui os maiores valores nos meses de primavera e inverno, possuindo os maiores valores no mês de setembro (FIETZ, FISCH, COMUNELLO & FLUMIGNAN, 2017).

No que tange a precipitação, o período menos chuvoso se concentra no primeiro decêndio de junho até o segundo de setembro, sendo o segundo decêndio de agosto o período com menor precipitação. Os maiores valores de precipitação ocorrem nos meses outubro e novembro e dezembro a março, sendo dezembro o mês mais chuvoso (FIETZ, FISCH, COMUNELLO & FLUMIGNAN, 2017).

TABELA 3. Precipitação pluviométrica decendial média e esperada na região de Dourados, MS, para diferentes níveis de probabilidade, durante o período de janeiro de 1980 a dezembro de 2015.

Decêndio	Média (mm)	Nível de probabilidade (%)						
		95	93	90	80	75	67	50
Janeiro								
01 a 10	45,8	0	2,4	5,3	12,9	16,5	22,2	35,6
11 a 20	59,3	6,4	9,3	12,8	22,3	26,6	33,5	49,3
21 a 31	53,6	2,3	4,1	6,6	14,5	18,5	25,3	41,9
Fevereiro								
01 a 10	47,8	5,4	7	9,1	15,8	19,1	24,5	37,5
11 a 20	51,9	9,4	11,4	14,1	21,9	25,6	31,4	44,8
21 a 28	40,4	4,3	5,6	7,3	12,9	15,7	20,3	31,4
Março								
01 a 10	34,4	3,3	4,9	6,8	12,3	14,8	18,9	28,1
11 a 20	58,8	5,6	7,3	9,8	17,8	21,8	28,6	44,9
21 a 31	46,1	0	0	4,3	15,8	20	26,5	40,6
Abril								
01 a 10	34,5	0	0	0	4,3	7,5	12,6	24,7
11 a 20	46	0	0	2,8	11,6	15,4	21,4	35,5
21 a 30	35,1	0	0	0	1,9	4	8,3	20,3
Mai								
01 a 10	26,1	0	0	0	1	2,9	6,4	15,8
11 a 20	36,4	0	0	0	4,9	7,9	13	25,7
21 a 31	43,3	0	0	0,9	7	10,3	15,8	30,1
Junho								
01 a 10	27,1	0	0,6	1,8	5,5	7,4	10,7	19
11 a 20	23	0	0	0	0	0	0,3	8,3
21 a 30	25	0	0	0	1	3,8	8,2	18,5
Julho								
01 a 10	16,2	0	0	0	0	0,9	2,9	9
11 a 20	12,2	0	0	0	0	0	0	4,8
21 a 31	19,2	0	0	0	0	0	1,3	8,8
Agosto								
01 a 10	15,3	0	0	0	0	0	0	4,9
11 a 20	11,1	0	0	0	0	0	0	0,9
21 a 31	18,5	0	0	0	0	0	0	5,3
Setembro								
01 a 10	36,8	0	0	0	0	0,9	5,4	19
11 a 20	24,1	0	0	0	0,7	2	4,8	13,5
21 a 30	41,1	0	0	4	12,9	16,5	21,9	33,8
Outubro								
01 a 10	40,3	0	0	2	9,2	12,4	17,7	30,2
11 a 20	50,3	3,4	5,4	7,9	15,5	19,2	25,2	39,3
21 a 31	50,5	6,5	8,2	10,6	17,8	21,3	27	40,4
Novembro								
01 a 10	62,6	10	12,4	15,6	25,2	29,8	37,1	54,3
11 a 20	45,2	0	0	2,6	11,7	15,6	21,7	36
21 a 31	54,8	4,4	7	10,1	19,2	23,4	30,3	46,4
Dezembro								
01 a 10	71,9	5,7	7,6	10,5	20,1	25,1	33,5	54,6
11 a 20	52,9	4	5,5	7,7	15	18,8	25,4	42
21 a 31	54,9	4,4	5,9	8,1	15,3	19	25,3	40,9

Fonte: Documentos 138. O clima da região de Dourados, MS

3.2 Solo e características do relevo

O solo da área experimental é do tipo Latossolo Vermelho distroférico, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (2006). Estes são solos com saturação por bases baixa ($V < 50\%$) e teores de Fe_2O_3 de 180g kg^{-1} a $< 360\text{g kg}^{-1}$ na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B (inclusive BA).

O solo em questão é profundo e apresenta textura argilosa (65 a 70% de argila), contudo, devido a presença de agregados, a capacidade de retenção de água é menor do que em solos tipicamente argilosos. Conseqüentemente, o solo apresenta alta infiltração de água e baixa capacidade de troca catiônica. A fração argila é do tipo 1:1, com predomínio de caulinita e óxido de ferro (REZENDE, 2016).

Com relação ao relevo, Dourados se encontra a 430m de altitude. Apesar da alta altitude, a região se localiza em uma área central plana, com declividades inferiores a 2° . A área experimental da Embrapa Agropecuária Oeste, possui características de relevo plano e sofreu correções químicas e físicas no preparo do solo para o cultivo da cana-de-açúcar.

3.3 Estação agrometeorológica

A estação agrometeorológica da Embrapa Agropecuária Oeste monitora os principais dados meteorológicos da região em tempo real, com coleta automática e publicação no site Guia Clima (<http://www.cpao.embrapa.br/clima/>). No site também é possível consultar o banco de dados da região, ferramenta utilizada no experimento em questão para os cálculos da ET_0 .

Seguindo as recomendações da FAO 56, a estação possui área de 1,4 ha e superfície coberta com a grama batatais (*Paspalum notatum* Flüggé). O gramado recebe roçagens frequentes para garantir o padrão de altura entre 8 e 15 cm e também irrigações periódicas para garantir a ausência de déficit hídrico da cultura.

A tabela (4) a seguir, lista os equipamentos utilizados na estação agrometeorológica da Embrapa Agropecuária Oeste de Dourados, MS.

TABELA 4. Equipamentos utilizados na estação agrometeorológica.

Equipamento	Variável medida	Modelo	Marca
Datalogger	Coletor de dados	CR1000	Campbell Scientific [®]
Termohigrômetro	Temperatura e umidade relativa do ar	HC 2S3	Rotronic [®]
Piranômetro	Radiação solar global	CMP3	Kipp & Zonen [®]
Saldo radiômetro	Saldo de radiação	Q-7.1	REBS [®]
Anemômetro sônico	Velocidade e direção do vento	WindSonic 1	Gill Instruments [®]
Barômetro	Pressão atmosférica	PTB 110	Vaisala [®]
Pluviômetro	Chuva	TE525MM	Texas Eletronics [®]

3.4 Área experimental

A área experimental possui 0,55ha, com dimensões de 85 x 65m (Figura 3). Ao longo da linha central da área estão localizados três lisímetros de pesagem direta, com área de 7,2m² e dimensões de 3,6 x 2m cada, porém para o estudo foi utilizado apenas 1 lisímetro. A cultura na área possui irrigação frequente para garantir seu máximo desenvolvimento e para que os valores da evapotranspiração não sejam afetados pelo déficit hídrico.

O plantio foi realizado no dia 6 de abril de 2018 com quatro variáveis diferentes da cana-de-açúcar (Figura 4), com sete linhas de RB 92759, RB 975201, RB 966928 e CTC 4. O lisímetro, por sua vez, foi cultivado com 4 linhas da variedade RB 966928 (Figura 5). Para o estudo em questão, será analisado a evapotranspiração somente da variedade RB 966928.

O manejo da irrigação ocorreu primeiramente por meio de aspersão fixa com turno de rega variável, onde o momento e a quantidade a ser irrigado eram obtidas pela leitura do balanço hídrico do lisímetro. O sistema de irrigação foi substituído pelo gotejamento 243 dias após a plantio (Figura 6), e seu manejo continuou sendo através das leituras do balanço hídrico do lisímetro

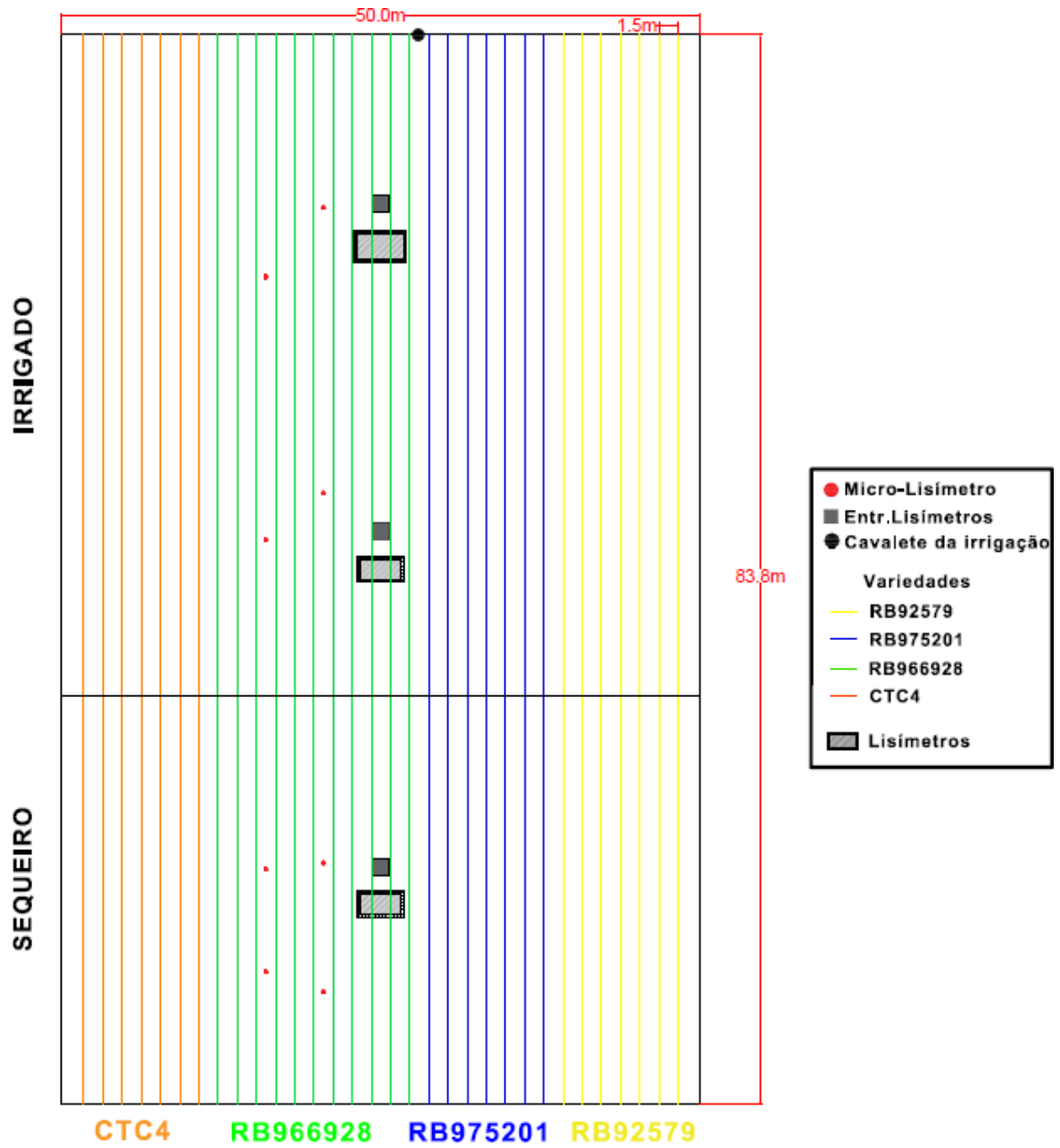


FIGURA 4. Layout da disposição de variedades.



FIGURA 3. Área experimental cultivada com a cana-de-açúcar.



FIGURA 5. Variedade RB966928 analisada no lisímetro de pesagem.

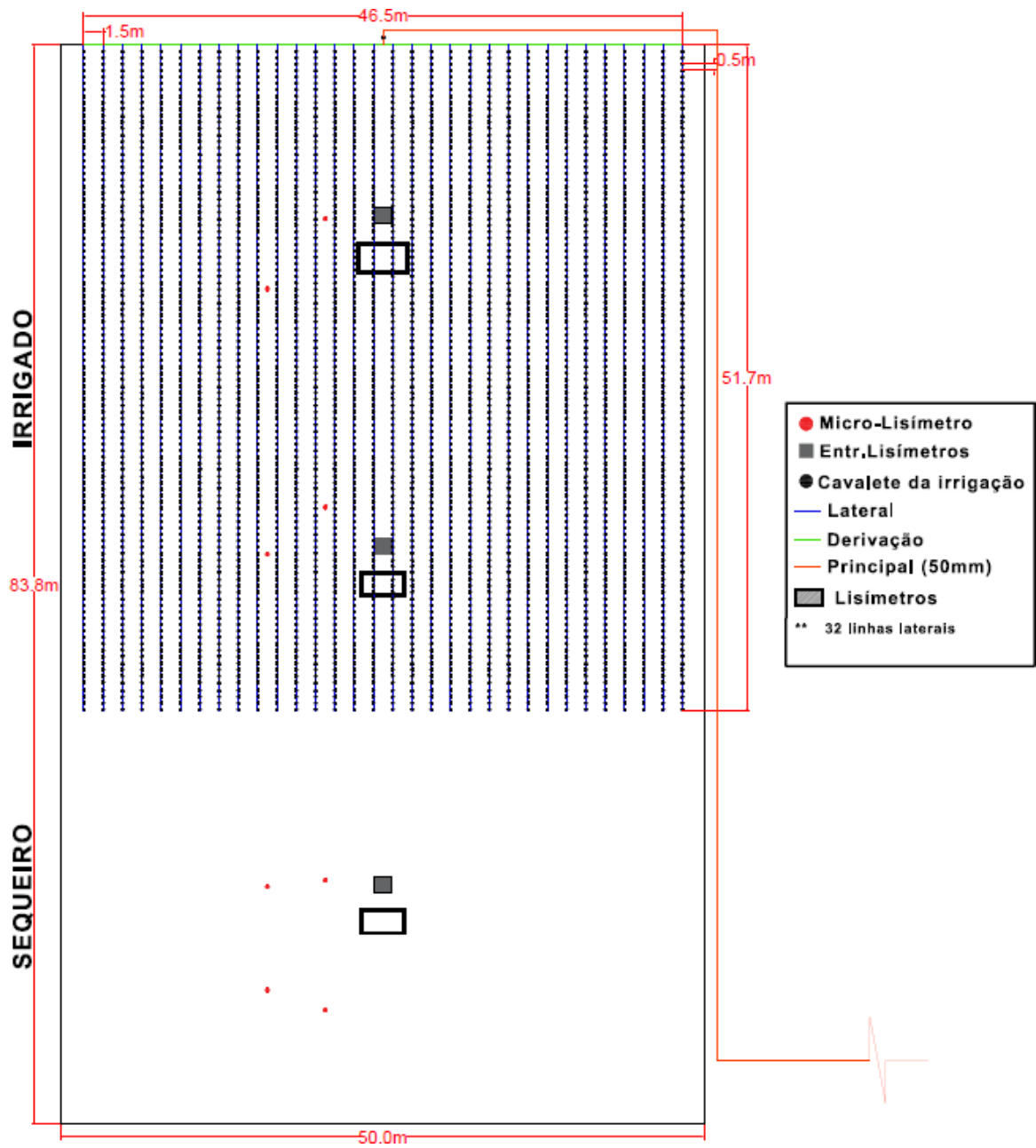


FIGURA 6. Layout do sistema de irrigação por gotejamento.

3.5 Lisímetro de pesagem e medição da evapotranspiração da cultura

O lisímetro construído na área experimental (Figura 7) possui área de 7,2m², com dimensões de 3,6 x 2m de área. O tanque utilizado para o lisímetro é de aço carbono tipo 1020, com profundidade útil de 1m abaixo do nível do solo e apoiado sobre quatro pilares de concreto, cada um com uma célula de carga da marca HBM[®], modelo RTNC3 4,7 ton. Cada célula de carga está conectada a um *datalogger* CR1000 da marca Campbell Scientific[®], cuja função é armazenar as leituras captadas pelas células de carga. A média do sinal captado pelas quatro células é convertida de mV para kg através do coeficiente de conversão, determinado no momento da calibração dos lisímetros.



FIGURA 7. Instalação do lisímetro. (A) Vista de cima do interior do lisímetro, (B) Tanque que será apoiado nos pilares e (C) Lisímetro instalados ao nível do solo.

Semanalmente, ao longo de toda a safra, foram realizadas as coletas de dados do *datalogger*. A coleta era feita com o software LoggerNet, instalado em notebook, onde este era conectado manualmente ao *datalogger* no momento da coleta (Figura 8). Os dados eram então convertidos para modelo compatível com o software Microsoft Office Excel®, para posterior análise do balanço hídrico.

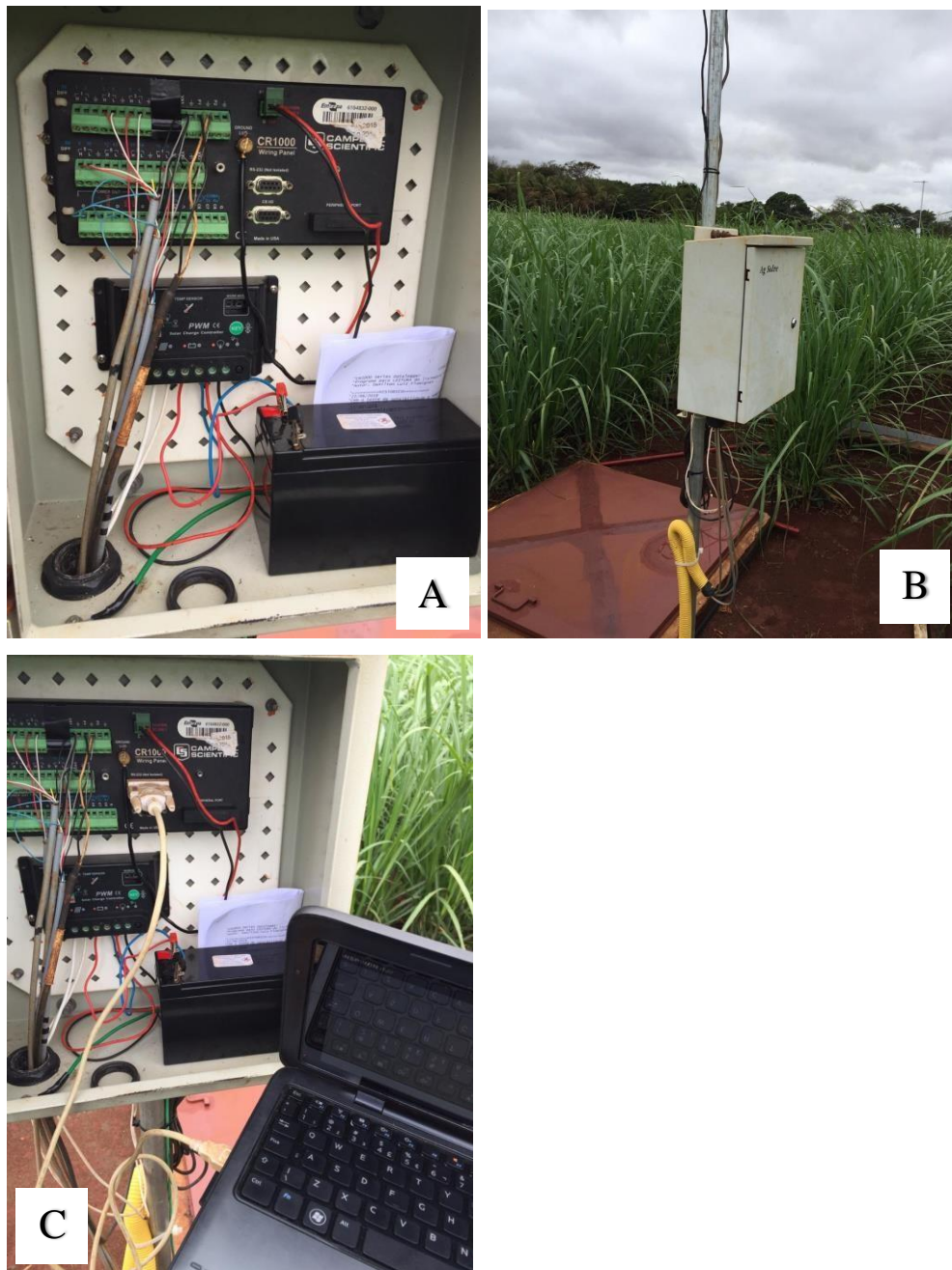


FIGURA 8. Procedimento para coleta de dados. (A) *Datalogger* com as conexões das células de carga, (B) Torre do *datalogger* e (C) Momento da coleta.

Com os dados convertidos para Microsoft Office Excel®, os cálculos para determinação da evapotranspiração seguiram de acordo com a equação (1).

3.6 Determinação da evaporação

A determinação da evaporação do solo foi baseada na metodologia de Flumignan et al. (2012), através dos microlisímetros (ML). Os ML foram confeccionados utilizando tubos de PVC rígido, com a estrutura interna possuindo diâmetro de 100mm, comprimento de 150mm e espessura de 2,5mm. A estrutura externa possui as mesmas medidas, porém seu diâmetro é de 150mm (Figura 9).

A extração das amostras de solo seguiu o modelo de Lena (2013) (Figura 10), que consiste em um amostrador, formado por um cilindro de corte, onde o PVC de 100 mm de diâmetro será inserido, e uma base que recebe golpes de um cilindro sólido com cerca de 10 kg para que o cilindro de corte seja penetrado no solo. O solo extraído é indeformado, e após a retirada do PVC, a amostra coletada recebe um CAP para evitar a perda de água por drenagem.

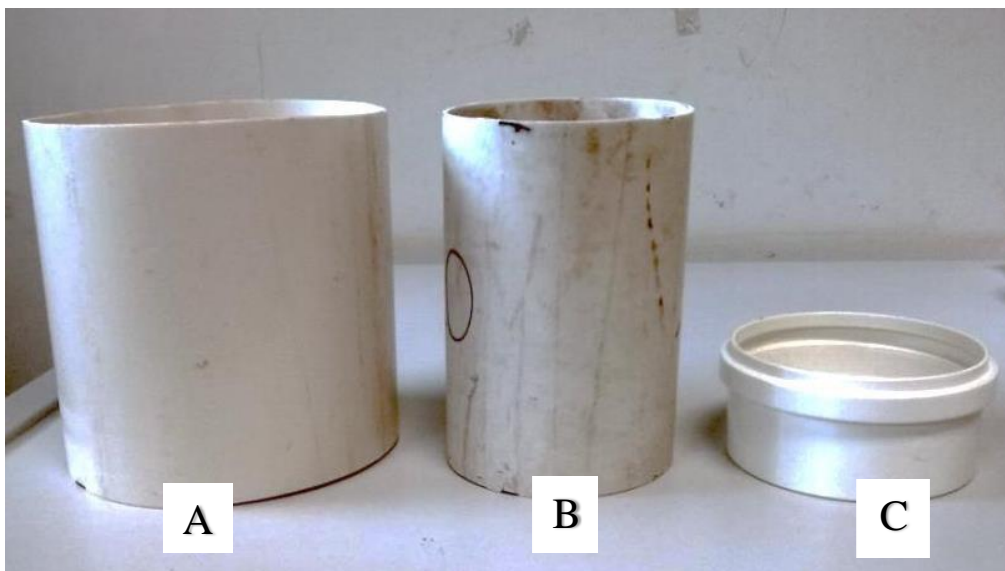


FIGURA 9. Componentes do microlisímetro. (A) Estrutura externa, (B) Estrutura interna e (C) CAP. Ilustração: REZENDE, M. K.A. Dissertação (Mestrado em agronomia).

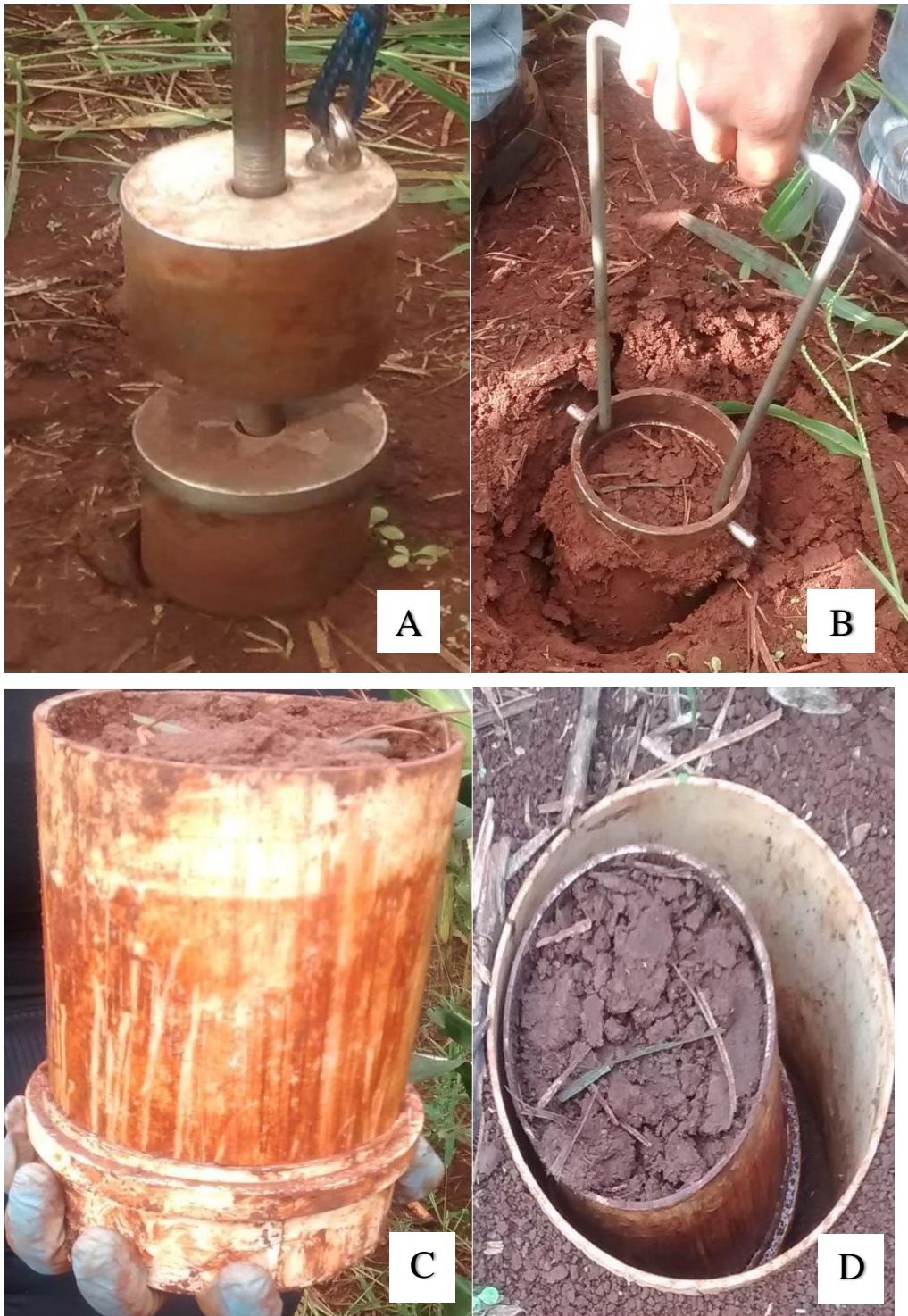


FIGURA 10. Extração das amostras de solo. (A) Golpes para extração da amostra, (B) Retirada do microlisímetro, (C) Microlisímetro com o CAP instalado, (D) ML devidamente instalado para uso. Ilustração: REZENDE, M. K.A. Dissertação (Mestrado em agronomia).

Após a instalação dos ML, que permaneceram em condições de campo, foram feitas cinco pesagens das amostras em dias consecutivos. As pesagens deveriam ser realizadas em

um período com ausência de chuva e irrigação, para que a veracidade do cálculo da variação de massa do ML fosse preservada. Durante toda a safra, foram realizadas extrações mensais de quatro séries de ML, estes instalados nas proximidades do lisímetro.

A evaporação do solo foi determinada pela variação de massa dos ML segundo a equação (6):

$$E = \frac{\Delta M}{\pi r^2} \quad (6)$$

Onde ΔM é a variação de massa do ML (g), r é o raio do ML (m) e E é a evaporação de água do solo (mm). Como o ML possui raio de 0,05 m, cada variação de 7,8 g indicará uma evaporação de 1 mm de lâmina de água.

3.7 Determinação da transpiração

Conhecendo os valores da evapotranspiração, por meio do lisímetro de pesagem, e da evaporação, por meio dos microlisímetros, foi possível determinar a perda de água por transpiração, segundo a equação (2). Para garantir um resultado coerente dos fenômenos hídricos do sistema, a análise da transpiração foi realizada no mesmo período onde eram determinados os valores da E .

3.8 Determinação dos valores de K_c , K_e e K_{cb}

No ciclo de desenvolvimento de uma cultura, o K_c , K_e e K_{cb} possuem três fases cada: Inicial, intermediária e final. Levando em consideração o tempo total do ciclo da cana-de-açúcar de ano, o presente estudo quantificou somente os coeficientes das fases iniciais e intermediárias.

Com os valores diários da ET_c , obtidos através do lisímetro de pesagem e da ET_0 , fornecidos no site Guia Clima foi possível determinar o K_c utilizando a equação (4). A partir dos valores de E , T e ET_0 foram determinados os valores de K_e e K_{cb} . Os valores da ET_0 foram integrados para que fosse possível compreender o mesmo período de avaliação dos ML.

Os valores de K_e e K_{cb} foram determinados segundo as equações (7) e (8), respectivamente:

$$K_e = \frac{E}{ET_0} \quad (7)$$

$$K_{cb} = \frac{T}{ET_0} \quad (8)$$

Onde K_e é o coeficiente de evaporação do solo (adimensional), E a evaporação do solo (mm), K_{cb} o coeficiente de cultivo basal (adimensional), T a transpiração da planta (mm) e ET_0 a evapotranspiração de referência (mm).

3.9 Determinação do índice de área foliar

Durante os meses de maio a setembro de 2018 o IAF foi determinado utilizando o método não destrutivo, que consiste na medição manual da largura e comprimento das folhas, utilizando fita métrica e em condição de campo.

As medições ocorreram mensalmente, em período próximo ao da extração dos ML, e foram selecionados três blocos ao acaso em cada medição. Cada bloco possuía 1m linear, com plantas em boa condição de desenvolvimento. Assim como os ML, os blocos selecionados para a análise do IAF possuíam a variedade RB 966928.

A área foliar foi modelada assumindo um fator de correção de 0,75 (SANGOI, 2007), como segue a equação (9):

$$AF = C \times L \times 0,75 \quad (9)$$

onde AF é a área foliar (m^2), C o comprimento da folha (m) e L a largura da folha (m).

O IAF por sua vez foi determinado segundo a equação (10):

$$IAF = \frac{ATF}{A} \quad (10)$$

onde IAF é o índice de área foliar (adimensional), ATF a área foliar total (m^2) e A a área ocupada por uma planta (m^2).

Todos os cálculos para a determinação do IAF foram realizados em software Microsoft Office Excel®.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Índice de área foliar

Para o presente trabalho, o IAF foi monitorado durante os meses abril a setembro de 2018. Como a fase de semeadura e início de brotamento ocorreram no início de abril, os valores significativos de IAF surgiram a partir do mês de maio.

O maior crescimento do IAF foi observado entre os meses de junho e julho, onde o valor passou de 0,2 para 0,9. Nos meses seguintes o crescimento continuou se expandindo gradativamente.

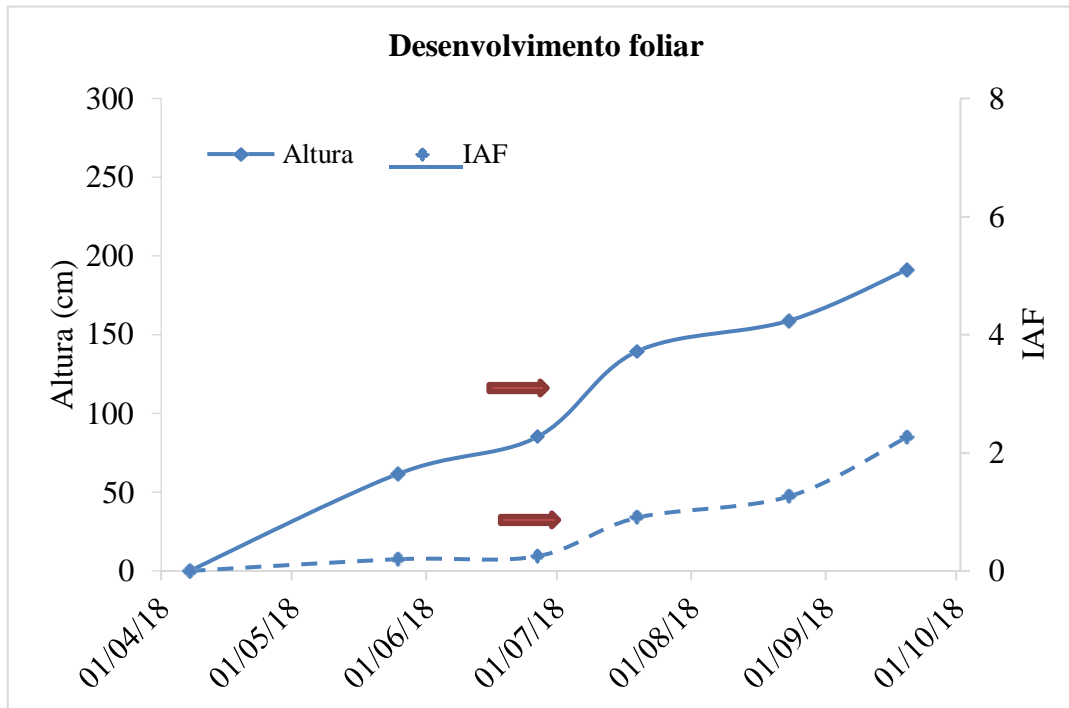
A tabela (5) ilustra o desenvolvimento foliar médio ao longo dos meses de maio a setembro:

TABELA 5: Valores do índice de área foliar (IAF), área foliar total (AFT), área foliar (AF) e altura da planta.

	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro
IAF	0,2	0,2	0,9	1,3	2,3
AFT (cm ²)	2982,9	3724,6	13525,3	18918,0	33908,6
AF (cm ²)	57,4	65,0	97,8	124,2	203,9
Altura (cm)	61,7	85,0	139,4	158,9	191,1

O gráfico (2) ilustra a relação entre a altura e o IAF durante os meses de abril a setembro. A seta indica o momento onde a curva se torna mais acentuada, evidenciando que o maior crescimento se deu entre junho e julho. Até o momento, a curvatura do gráfico mostra que a cultura não atingiu seu ponto de senescência e, portanto, os valores de IAF tendem a aumentar.

GRÁFICO 2. Crescimento foliar da cana-de-açúcar durante os meses de estudo.

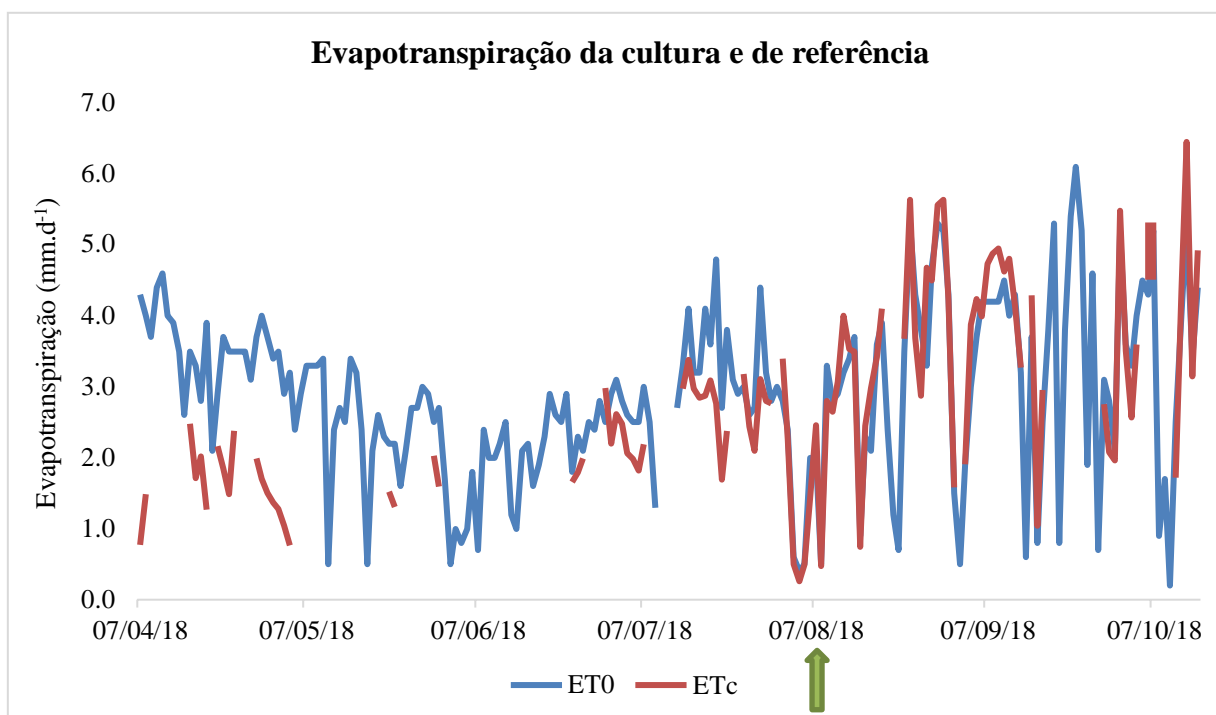


4.2 Evapotranspiração

As taxas de ET_0 foram superiores as taxas de ET_c nas fases iniciais, fenômeno este que pode ser explicado pela pequena área foliar nos primeiros dias do ciclo da cultura, acarretando em um valor baixo de transpiração da planta, quando comparado com a cultura de referência.

Pelo gráfico (3) é possível observar que a partir de agosto os valores de ET_c se sobrepõem aos valores da ET_0 , indicando o início da fase de desenvolvimento da cultura. como observado anteriormente, até o presente momento o maior desenvolvimento foliar ocorreu entre os meses de junho e julho, este fato explica os altos valores de ET_c , uma vez que a cultura possui maior área foliar, e assim sua taxa de transpiração aumenta.

GRÁFICO 3. Análise da evapotranspiração da cultura (ET_c) e da evapotranspiração de referência (ET_0).



Os dados obtidos indicam que a fase inicial ocorreu de abril a julho, e a fase de desenvolvimento se iniciou em agosto. Após a fase de desenvolvimento, de acordo com Allen et al. (1998), é esperado que a cultura atinja um patamar máximo de evapotranspiração, representado pela fase intermediária e em seguida diminua seu valor gradativamente com o processo de senescência, representado pela fase final.

O valor médio da ET_c na fase inicial foi de $2,1 \text{ mm.dia}^{-1}$ e na fase de desenvolvimento estudada até o momento foi de $3,4 \text{ mm.dia}^{-1}$. Com isso, pode-se observar que a demanda hídrica aumentou a partir de agosto.

4.3 Coeficiente de cultivo e IAF

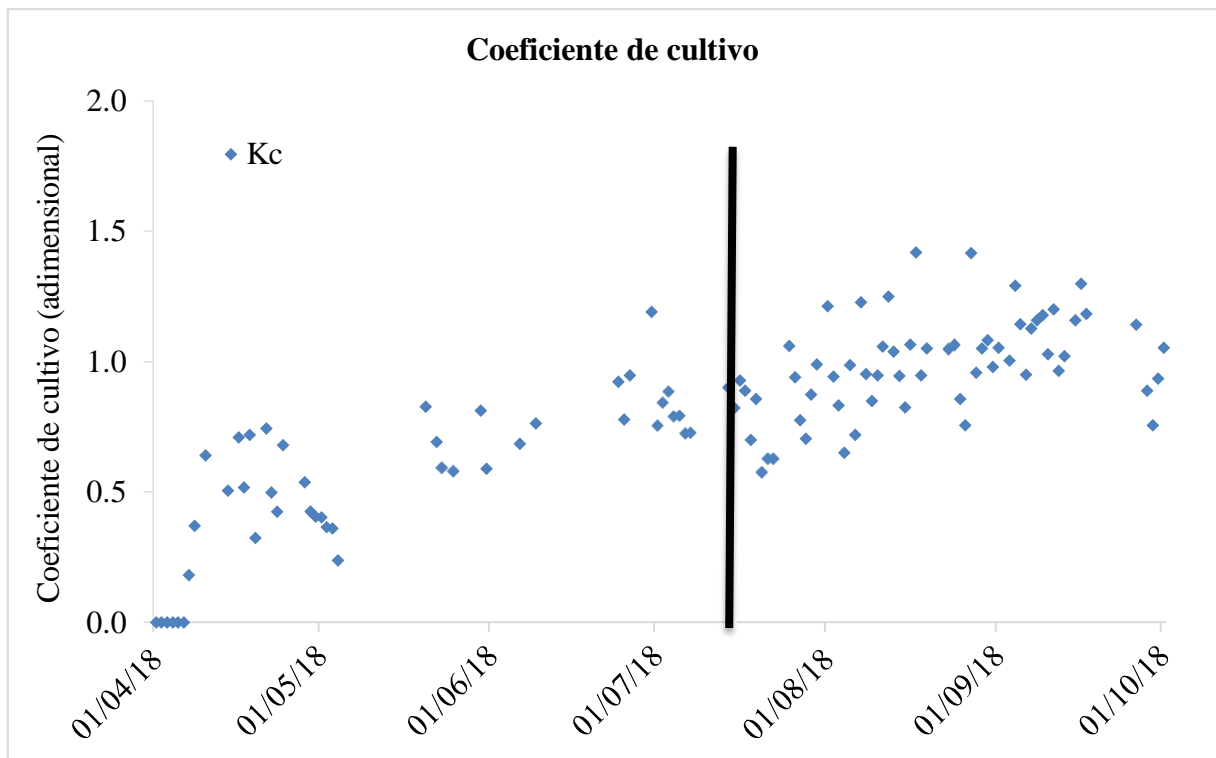
A determinação do K_c se dá pela equação (4), logo a ET_c e o K_c são diretamente proporcionais. Como visto no item 4.2, a fase inicial do cultivo possuiu valores de ET_0 maiores do que os valores de ET_c , com isso os valores predominantes do K_c inicial foram menores comparados aos da fase de desenvolvimento, onde a ET_c e ET_0 se sobrepuseram.

O valor médio do K_c inicial e do K_c na fase de desenvolvimento foram 0,7 e 1,0, respectivamente. Os valores são coerentes com a equação (4), pois no momento em que a ET_0

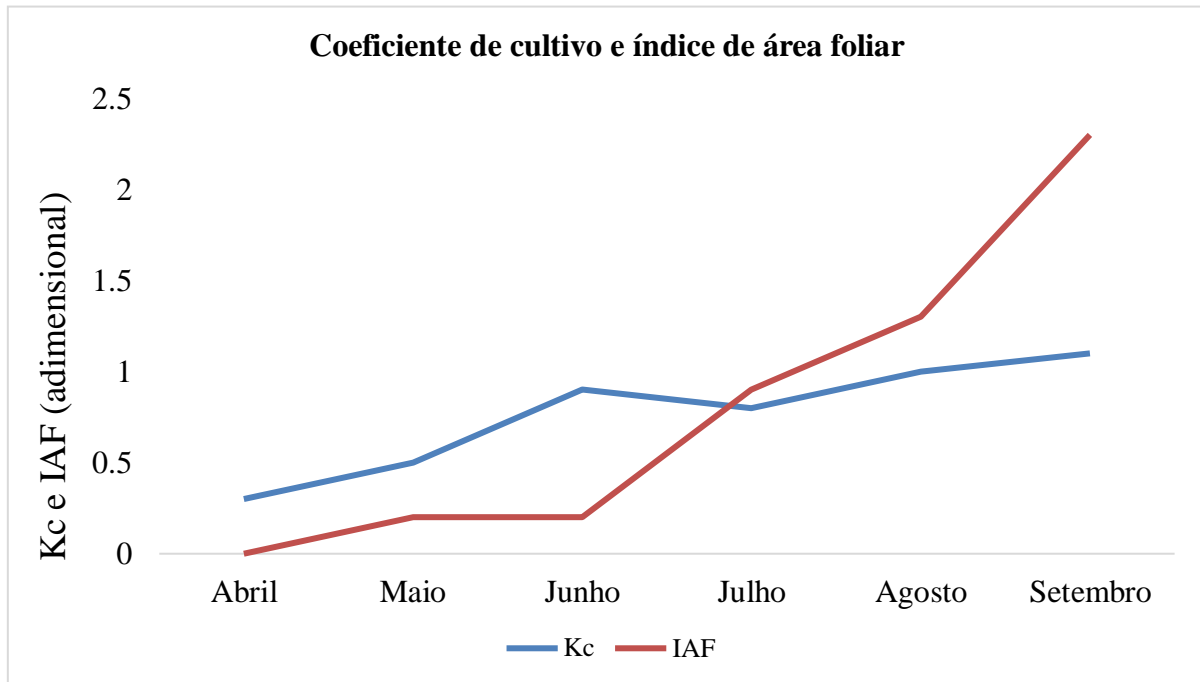
foi superior a ET_c , o K_c possuiu valor menor que 1, da mesma maneira que quando as evapotranspirações obtiveram valores semelhantes, o K_c obteve o valor de 1.

Pelo gráfico (4) é possível visualizar os baixos valores de K_c inicial no período de abril a julho, e em seguida a curva tende a uma inclinação positiva, indicando que a partir de agosto, juntamente com o período de crescimento da área foliar e da ET_c , o K_c aumenta seu valor e passa para a fase de desenvolvimento.

GRÁFICO 4. Coeficiente de cultivo (K_c) nos meses de abril a outubro.



Analisando o K_c em paralelo ao IAF, é possível identificar no gráfico (5) que a partir de julho os valores de IAF superam os valores de K_c , indicando que a cultura continua aumentando sua área foliar, porém o K_c atingiu o platô. Tal fenômeno esperasse que deverá continuar até o momento da senescência, onde a área foliar diminuirá, conseqüentemente as taxas de transpiração serão menores do que as de evaporação e o K_c regredirá.

GRÁFICO 5. Relação entre K_c e IAF

4.4 Evaporação, transpiração, coeficiente de evaporação e coeficiente de cultivo basal

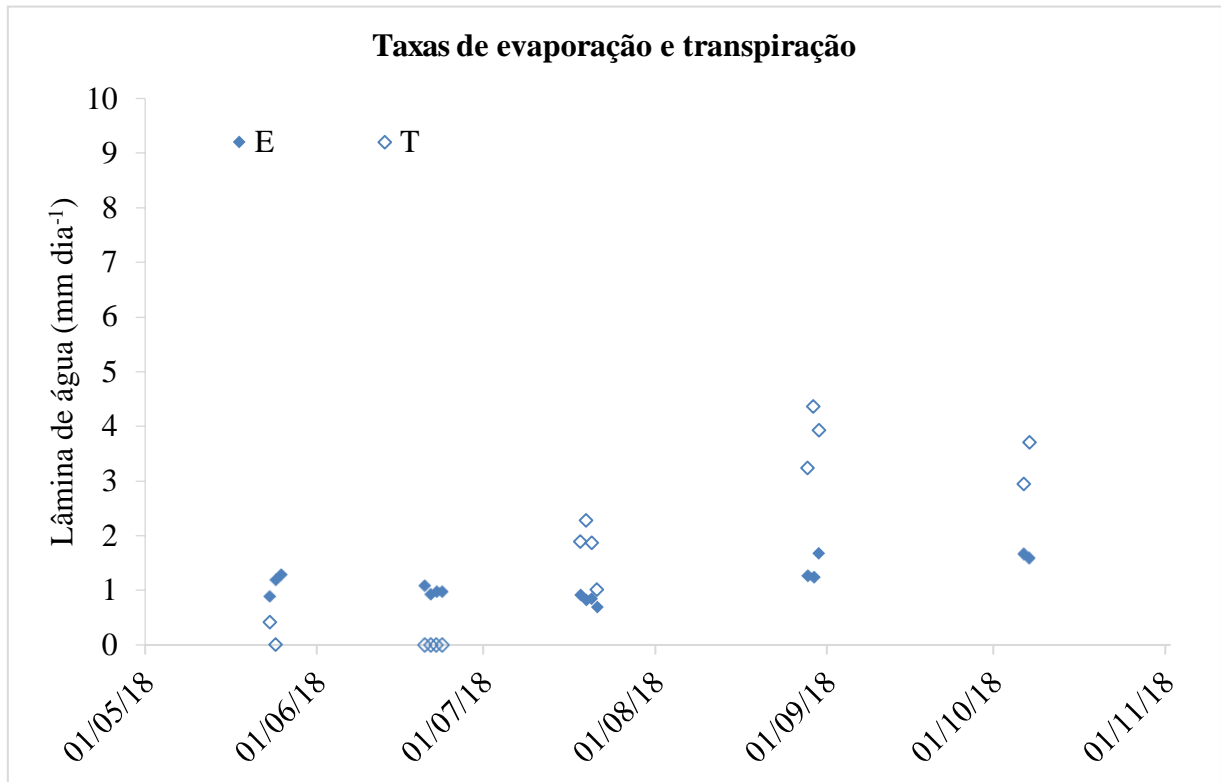
Na fase inicial do ciclo, onde o solo se encontrava mais exposto as condições ambientais e a área foliar não eram expressivas, de modo que as taxas de evaporação foram maiores do que as de transpiração. Conforme a cultura se desenvolveu, aumentando sua área verde e cobrindo o solo, as taxas de transpiração se tornaram maiores do que as de evaporação.

Segundo as equações (7) e (8), o K_c e o K_{cb} são diretamente proporcionais a evaporação e transpiração, respectivamente. Entende-se, portanto, que o comportamento da curva do K_c é semelhante ao comportamento da curva de E , assim como a curva do K_{cb} com relação a T .

Como estabelecido nos itens 4.2 e 4.3, a fase inicial ocorreu entre os meses de abril a julho, e a fase de desenvolvimento ocorreu a partir de agosto, baseado nesta divisão foi identificado que os valores médios do K_c inicial e em desenvolvimento foram de 0,4 e 0,3, respectivamente. Com relação ao K_{cb} , seus valores médios inicial e em desenvolvimento foram de 0,2 e 0,7, respectivamente.

O gráfico (6) estabelece um comparativo entre as taxas de evaporação e transpiração durante o período analisado:

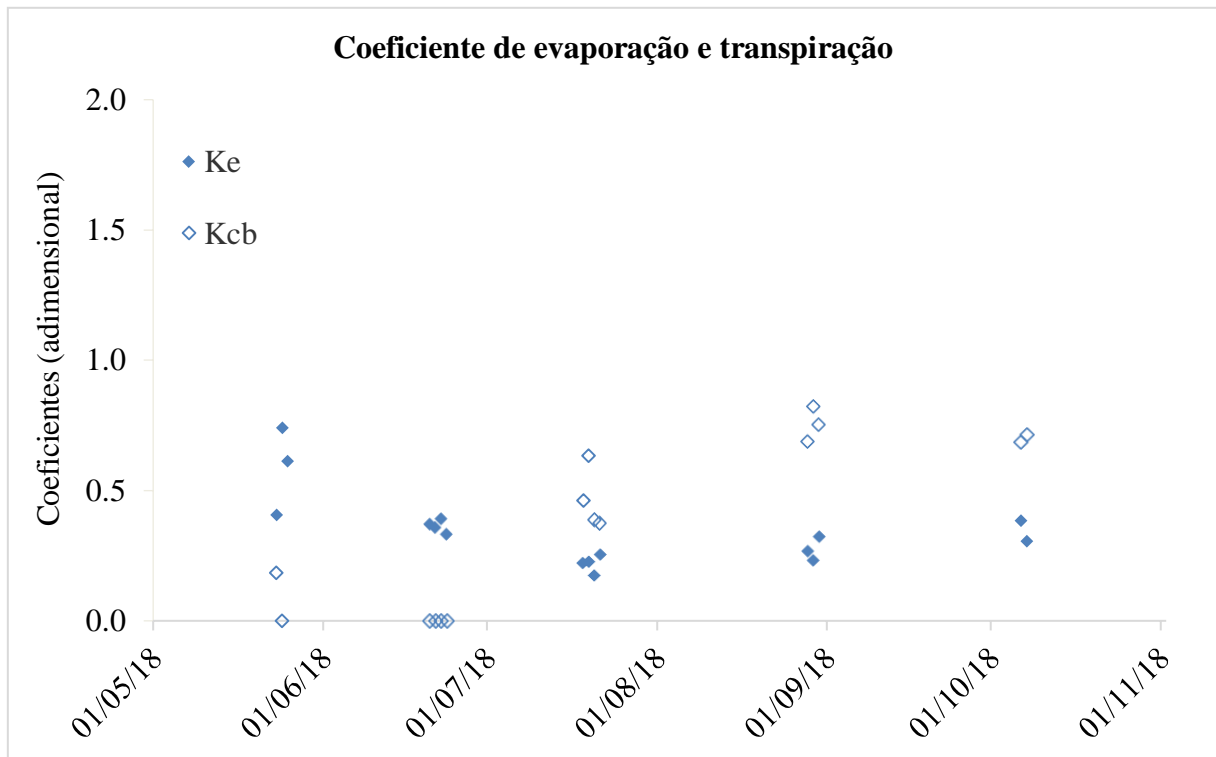
GRÁFICO 6. Análise da evaporação (E) e transpiração (T) nos meses de junho a outubro.



A análise do gráfico (6) indica que no mês de agosto as taxas de transpiração foram superiores as taxas de evaporação, o que evidencia que neste período a área foliar sobrepôs o solo ao ponto da transpiração se tornar mais significativa do que a evaporação no que tange a perda de água no sistema.

O gráfico (7) estabelece a relação entre o K_e e o K_{cb} no mesmo período de estudo do gráfico (6).

GRÁFICO 7. Análise do coeficiente de evaporação (K_e) e do coeficiente de cultivo basal (K_{cb}) nos meses de junho a outubro.



Assim como a T passou a superar a E no mês de agosto, os valores de K_{cb} foram superiores aos do K_e no mesmo período, confirmando a relação existente nas equações (7) e (8).

5. CONCLUSÃO

Os valores recomendados para o K_c inicial e de desenvolvimento, a partir da análise deste trabalho, são respectivamente: 0,7 e 1,0.

Com relação aos valores recomendados para o K_e inicial e de desenvolvimento, estes são respectivamente: 0,4 e 0,3.

Por fim, os valores recomendados para o K_{cb} inicial e de desenvolvimento, são respectivamente: 0,2 e 0,7.

A modelagem do K_c em função do IAF, relatou que a partir do mês de julho o IAF superou os valores do K_c , antes da cultura iniciar sua fase intermediária, indicando que o K_c atingiu seu valor máximo no ciclo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABOUKHALED, A.; ALFARO, A.; SMITH, M. **Lysimeters**. Rome: FAO 1982. 68 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 39).

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

ANA – Agência Nacional das Águas. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: informe 2010**. Brasília – DF. 78p. 2010.

AZEVEDO, P. V. de; SILVA, B. B. da; SILVA, V. de P. R. **Water requirements of irrigated mango orchards in northeast Brazil**. *Agricultural Water Management*, v.58, p.241-254, 2003.

BAKER, F.G.; VENEMAN, P.L.M. & BOUMA, J. **Limitations of the instantaneous profile method for field measurement of unsaturated hydraulic conductivity**. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 38:885-888, 1974.

BEZERRA, J. R. Evapotranspiração e coeficiente de cultivo do algodoeiro BRS-200 Marrom, irrigado **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** v.14, n.6, p.625–632, 2010 Campina Grande, PB, UAEEA/UFCEG.

BOEHRIGER, D., 1982 – **Determinação da transpiração da cana-de-açúcar por métodos térmicos**. Viçosa, MG, 2010. Xv, 97f.: (algumas col.); 29 cm.

CARNEIRO, V. A. **Cana-de-açúcar: Uma abordagem climática**. *Revista mirante*, Anápolis (GO), v. 8, n. 3, 2015. ISSN 19814089.

CASTRO, S. S. **A expansão da cana-de-açúcar no cerrado e no estado de goiás: Elementos para uma análise espacial do processo** - *B.goiano.geogr.* Goiânia, v. 30, n. 1, p. 171-191, jan./jun. 2010.

CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. **Monitoramento agrícola – Cana-de-açúcar**, Acomp. safra bras. cana, v. 5 - Safra 2018/19, n. 2 - Segundo levantamento, Brasília, p. 1-86, agosto 2018.

DANTAS NETO, J.; FIGUEREDO J.L. da C.; FARIAS, C.H. de A.; AZEVEDO, H.M.; AZEVEDO, C.A.V. de. Resposta da cana-de-acucar, primeira soca, a níveis de irrigação e Adubação de cobertura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, p.283-288, 2006.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação do Solo**. Brasília: EMBRAPA- CNPS, 2006. 286p.

FIETZ, C. R. et al. **O clima na região de dourados, MS** 3 ed. rev. e atual – Dourados, MS: Embrapa Agropecuária Oeste, 2017.

FLEXAS, J. et al. Keeping a positive carbon balance under adverse conditions: responses of photosynthesis and respiration to water stress. **Physiologia Plantarum**, v. 127, p. 343-352, 2006.

FLUMIGNAN, D L. **Evapotranspiração, seus componentes e coeficientes de cultivo simples e dual de cafeeiros**. Londrina. 2008. 90p. Dissertação (Mestrado em Agronomia).

FLUMIGNAN, D L. **Lisímetros de pesagem direta para o estudo do consumo hídrico do pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.)** . Piracicaba. 2011. 200 p. Tese de Doutorado. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz.

GUIA CLIMA. **Sistema de monitoramento agroclimático de Mato Grosso do Sul**. Disponível em: <<http://www.cpa0.embrapa.br/clima/>>. Acesso: Abril até Novembro de 2018.

HERMANN, E.R. & G.M.S. CÂMARA. 1999. **Um método simples para estimar a área foliar de cana-de-açúcar**. Revista da STAB, 17: 32-34.

HILLEL, D.; KRENTOS, V.D. & STYLIANOU, Y. **Procedure and test of an internal drainage method for measuring soil hydraulic characteristics in situ**. Soil Sci., 114:395-400, 1972.

HURTADO, A. L. B et al. **Parametrização do método do perfil instantâneo para a determinação da condutividade hidráulica do solo em experimentos com evaporação**. R. Bras. Ci. Solo, 29:301-307, 2003a.

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.

KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 15, n. 3, p. 259-263, 2006.

LEME, E.J.A., M.A. MANIERO & J.C. GUIDOLIN. 1984. **Estimativa da área foliar da cana-de-açúcar e sua relação com a produtividade**. Cadernos Planalsucar, 2: 3-22.

LENA, B. P. **Consumo hídrico do pinhão-manso (*Jatropha curcas L.*) irrigado e sem irrigação na fase de formação**. Piracicaba. 2013. 62 p. Dissertação de mestrado Doutorado. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz.

MACHADO, E.C., A.R. PEREIRA, J.I. FAHL, H.V. ARRUDA & J. CIONE. 1982. **Índices biométricos de duas variedades de cana-de-açúcar**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 17: 1323-1329

MAPA. Ministério da Agricultura e Pecuária. **Cana-de-açúcar**. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/milho>> Acesso em 08 set de 2018.

MOZAMBANI, A. E., et al Morfologia da cana-de-açúcar. **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. 1 ed. Divisão de biblioteca e documentação – ESALQ/USP, 2006. P. 12-14.

OLIVEIRA, R. A.; DAROS, E.; ZAMBON, J. L. C.; WEBER, H.; IDO, O.T.;ZUFELLATO-RIBAS, K. C.; KOEHLER, H. S.; SILVA, D. K. T. **Área foliar em três cultivares de cana-**

de-açúcar e sua correlação com a produção de biomassa. Pesquisa Agropecuária Tropical, v.37, n.2, p.71-76, 2007.

PAIGE, G.B. & HILLEL, D. **Comparison of three methods for assessing soil hydraulic properties.** Soil Sci., 155:175-189, 1993.

PAIVA, A. S.; FERNANDES, E. J.; RODRIGUES, T. J. D.; TURCO J. E. P.; **Condutância Estomática de Feijoeiro Submetido a Diferentes Regimes de Irrigação.** Engenharia Agrícola, v.25, n.1, p.161-169, 2005.

PLANALTO. **Política Nacional dos Biocombustíveis.** Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/lei/L13576.htm>. Acesso em 20 de agosto de 2018.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações.** Barueri: Manole, 2004. 478 p.

REZENDE, M. K. A. **Evaporação, coeficiente de cultivo simples e dual do milho safrinha para região de Dourados-MS.** 2016. 76p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá.

SILVA, C. R. da. et al. **Variação sazonal na evapotranspiração de plantas jovens de lima ácida ‘Tahiti’.** Irriga, Botucatu, v.11, n.1, p.26-35, 2006.

SILVA, M. A.; Silva, J. A. G.; Enciso, J.; Sharma, V.; Jifon, J. **Yield components as indicators of drought tolerance of sugarcane.** Scientia Agricola, v.65, p.620-627, 2008.

TEJERA, N. A.; RODÉS, R.; ORTEGA, E.; CAMPOS, R.; LLUCH, C. **Comparative analysis of physiological characteristics and yield components in sugarcane cultivars.** Field Crops Research, v.102, p.64-72, 2007.

TERAUCHI, T. & MATSUOKA, M. 2000. **Ideal characteristics for the early growth of sugarcane.** Japanese Journal of Crop Science, 69: 286-292.

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