**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

Evapotranspiração, transpiração e trocas gasosas em canavial irrigado

Daniel Silveira Pinto Nassif

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas
Agrícolas

**Piracicaba
2015**

Daniel Silveira Pinto Nassif
Engenheiro Agrônomo

Evapotranspiração, transpiração e trocas gasosas em canavial irrigado

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **FABIO RICARDO MARIN**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas
Agrícolas

Piracicaba
2015

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - DIBD/ESALQ/USP**

Nassif, Daniel Silveira Pinto
Evapotranspiração, transpiração e trocas gasosas em canavial irrigado /
Daniel Silveira Pinto Nassif. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr
6018 de 2011. - - Piracicaba, 2015.
123 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2014.

1. Irrigação 2. Fator de desacoplamento 4. Produtividade de água 5. Modelagem
I. Título

CDD 633.61
N268e

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

Aos meus pais José Alberto e Evani,
Aos meus irmãos Guilherme e Silvia,
À minha amada Daniela

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, ao Departamento de Engenharia de Biosistemas e ao PPG em Engenharia de Sistemas Agrícolas pela oportunidade de realização do doutorado.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo financiamento através do processo número 2011/18072-2.

Ao amigo e orientador Prof. Fábio R. Marin pela orientação, paciência e ensinamentos que foram fundamentais para meu desenvolvimento profissional e pessoal.

À EMBRAPA/CNPTIA pelo auxílio à realização da pesquisa.

À Usina Costa Pinto, grupo Raizen, pela doação das mudas de cana-de-açúcar utilizadas na área experimental.

À Universidade da Flórida, em especial ao Prof. Kenneth Boote pela oportunidade de realização de estágio no exterior.

Aos professores Marcos V. Folegatti e Jarbas H. Miranda, pela autorização de uso da primeira área experimental.

Aos professores Luiz R. Angelocci, Paulo C. Sentelhas e Evandro Z. Righi, pelas valiosas sugestões apresentadas no exame de qualificação.

A todos que me auxiliaram no árduo trabalho de campo, em especial ao Leandro, Murilo, Lino, Serjão, André, Pedro, Adriano, Leonardo (tchê) e Gabriel.

Aos colegas de cúpula e do laboratório, pelo companheirismo, amizade, ensinamentos e pela “bagunça”, sempre importantes para distração e os famosos churrasquinhos.

À Ângela, Fernando e Davilmar pelo apoio sempre que precisei.

A todos que de alguma forma auxiliaram neste projeto.

SUMÁRIO

RESUMO.....	9
ABSTRACT	11
1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS	15
2.1 Gerais.....	15
2.2 Específicos.....	15
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1 Cana-de-açúcar	17
3.1.1 Origem e Histórico	17
3.1.2 Aspectos socioeconômicos	17
3.1.3 Morfologia	20
3.1.4 Crescimento e desenvolvimento	22
3.2 Transpiração	28
3.2.1 Fluxo de seiva	28
3.2.2 Condutância estomática e fator de desacoplamento	30
3.3 Evapotranspiração	31
3.3.1 Método do Balanço de Energia - Razão de Bowen	32
3.3.2 Coeficiente de cultivo (Kc).....	33
3.4 Modelos de crescimento de culturas.....	34
3.4.1 Modelagem da cultura de cana-de-açúcar	36
3.5 Produtividade de água na cana-de-açúcar	39
4 MATERIAL E MÉTODOS	41
4.1 Caracterização da área experimental	41
4.2 Análises biométricas e tecnológicas	44
4.3 Método da Razão de Bowen.....	48
4.4 Fluxo de seiva por meio do balanço de calor	51

4.5 Trocas Gasosas.....	55
4.6 Simulações do consumo hídrico, crescimento e desenvolvimento	57
4.7 Produtividade de água.....	59
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
5.1 Dados meteorológicos da área experimental e irrigação	61
5.2 Biometria e análise tecnológica	64
5.3 Método da Razão de Bowen	68
5.4 Fluxo de seiva	75
5.5 Trocas gasosas e condutância estomática	83
5.6 Fator de desacoplamento.....	90
5.7 Relações entre evapotranspiração, transpiração, coeficiente de cultivo e acoplamento vegetação-atmosfera	95
5.8 Avaliação dos algoritmos de transpiração e evapotranspiração do modelo DSSAT/CANEGRO	104
5.9 Produtividade de água.....	109
6 CONCLUSÕES	111
REFERÊNCIAS.....	113

RESUMO

Evapotranspiração, transpiração e trocas gasosas em canavial irrigado

As mudanças climáticas globais e a expansão da cultura da cana-de-açúcar para regiões com menor suprimento hídrico elevaram a importância de estimativas consistentes das necessidades de água da cultura. Na tentativa de contribuir nesse campo, o presente trabalho buscou analisar o consumo hídrico da cana-de-açúcar em três diferentes escalas espaciais: folha, planta e dossel, além de uma ferramenta de simulação (DSSAT/CANEGRO) quanto ao seu desempenho na estimativa do consumo hídrico da cana-de-açúcar. Foram realizadas medidas de evapotranspiração do dossel pelo método do balanço de energia-razão de Bowen (MRB) e de transpiração das plantas por meio do balanço de calor nos colmos (BC) e das folhas com um analisador de gás à infravermelho (IRGA). Duas áreas experimentais foram utilizadas, sendo a primeira com a variedade CTC 12, na safra 2011/2012, irrigada por gotejamento subsuperficial; a segunda área com a variedade RB867515, irrigada por aspersão por meio de um pivô central, na safra 2012/2013. O acoplamento planta-atmosfera também foi avaliado. As análises do MRB indicaram um fluxo de calor latente médio de 70% da energia disponível no ambiente, com 25% de fluxo de calor sensível e 5% no fluxo de calor no solo. Com a mesma metodologia a evapotranspiração da cultura média (ETc) foi estimada em 3,92 e 3,25 mm dia⁻¹ para as variedades CTC 12 e RB867515, respectivamente, resultando em um coeficiente de cultura (Kc) médio de 1,37, na fase de pleno desenvolvimento vegetativo. No período experimental, o canavial permaneceu mais acoplado à atmosfera (Ω médio=0,37) e a transpiração avaliada pelo BC chegou a 4,7 e 3,62 mm dia⁻¹, respectivamente para CTC 12 e RB867515. A metodologia do IRGA resultou em perda de água ao nível foliar da faixa de até 1 mm h⁻¹. Conforme a demanda atmosférica, o Kc da cultura apresentou-se variável em função da evapotranspiração de referência (ETo). O modelo DSSAT/CANEGRO mostrou-se eficiente na simulação da ETc e transpiração do canavial, com resultados mais satisfatórios ($R^2=0,59$) quando utiliza-se a metodologia FAO 56 nas simulações.

Palavras-chave: Irrigação; Fator de desacoplamento; Produtividade de água; Modelagem

ABSTRACT

Evapotranspiration, transpiration and gas exchange on irrigated sugarcane crop

Global climate change and the sugarcane crop expansion to regions with lower water supply became more important the real estimate of crop water requirements. This study aimed to contribute on this regard by analyzing the sugarcane water consumption at three different spatial scales: leaf, plant and canopy. The DSSAT/CANEGRO crop model was also evaluated with respect to sugarcane transpiration and evapotranspiration. Bowen ratio energy balance (BREB) method was performed to measure crop canopy evapotranspiration and the transpiration were measured with sap flow by stem heat balance for plant scale and infra-red gas analyzer (IRGA) for leaf scale. Two experimental sites were used: the first with CTC 12 cultivar and drip irrigation, on 2011/2012 season; in the second experiment the RB867515 variety was grown under sprinkler irrigation by a central pivot, on the 2012/2013 growing season. The plant-atmosphere decoupling factor was also evaluated. BREB method showed latent heat flux representing 70% of the available energy, 25% for sensible heat flux, and 5% for soil heat flux. BREB crop evapotranspiration (ET_c) ranged from 3.92 to 3.25 mm day⁻¹ for CTC 12 and RB867515, respectively, resulting in a mean crop coefficient (K_c) of 1.37 at the full vegetative growth stage. In the experimental period, sugarcane crop was coupled to the atmosphere ($\Omega=0.37$) and transpiration assessed by HB reached 4.7 and 3.62 mm day⁻¹ for CTC 12 and RB867515, respectively. IRGA method showed a leaf water loss up to 1 mm h⁻¹. K_c varied with reference evapotranspiration (ET_o) The DSSAT/CANEGRO crop model was efficient in the ET_c and transpiration simulation, with better results ($R^2=0.59$) when using FAO 56 ET_o method in the simulations.

Keywords: Irrigation; Decoupling factor; Water use efficiency; Modeling

1 INTRODUÇÃO

A discussão em torno das mudanças climáticas globais, a alta nos preços do petróleo e do açúcar e o aumento da demanda interna por etanol, estão entre os principais fatores que impulsionaram a expansão da cultura da cana-de-açúcar desde o início deste século. O etanol vem sendo reconhecido mundialmente como combustível renovável com grande potencial comercial. O Brasil, por sua vez, tem atraído atenção mundial por causa do sucesso de seu programa de energia baseado largamente no uso do etanol, do bagaço e da palha de cana-de-açúcar.

Segundo Manzatto et al. (2009), grande parte da área para a expansão do cultivo da cana-de-açúcar poderá ocorrer em áreas de pastagens degradadas principalmente na região Centro-Oeste, onde é necessária a suplementação parcial da demanda hídrica da cultura. Na região Nordeste do Brasil, principalmente nos tabuleiros costeiros, o clima e os solos rasos também tornam a irrigação recomendável. Na região Sudeste, principal produtora do Brasil, a irrigação, de modo geral, não é uma prática imprescindível, mas em algumas regiões mais quentes e sobre solos de menor retenção hídrica a irrigação pode ser viável economicamente. Para tanto, a obtenção de informações básicas sobre a demanda hídrica da cultura é um requisito importante para estimativas menos incertas sobre a necessidade de água da cultura, tendo em vista o planejamento e tomada de decisão em sistemas de irrigação.

Alguns autores já estudaram a necessidade hídrica da cultura da cana-de-açúcar, encontrando resultados diversos quanto ao coeficiente de cultura (K_c), com desvio padrão de até 150% (SANTOS, 2005). Possivelmente, tal variabilidade deve-se à influência de fatores determinantes sobre a perda de água nos canaviais, e que nem sempre são mensurados em estudos sobre consumo hídrico. Um deles é o fator de desacoplamento atmosfera-vegetação, que se mostrou uma variável de influência em sistemas agrícolas com cobertura descontínua do terreno (MARIN et al., 2005; MARIN e ANGELOCCI, 2011), mas cuja abordagem não foi devidamente aplicada para culturas com cobertura contínua do terreno. Segundo Jarvis e McNaughton (1985) a extrapolação de resultados experimentais sobre o consumo hídrico em plantas pode inserir incerteza no processo em decorrência da passagem de escala. Assim, na tentativa de reduzir esta fonte de incerteza e oferecer subsídios consistentes ao aprimoramento do manejo da irrigação em canaviais, uma opção é utilizar um conjunto de técnicas de medida em diferentes escalas dentro do canavial, e mesmo de modelos de simulação, justificando o presente trabalho.

2 OBJETIVOS

2.1 Gerais

Estudar o consumo hídrico de um canavial, particionando-o em evapotranspiração e transpiração, relacionando-o às variáveis meteorológicas e simulando os processos envolvidos.

2.2 Específicos

- a) Estudar o balanço de energia e o consumo hídrico de um canavial irrigado.
- b) Avaliação da transpiração de um canavial irrigado.
- c) Analisar o acoplamento entre a planta e a atmosfera durante o ciclo da cultura e a sua interferência na perda de água da cultura.
- d) Determinar valores de K_c .
- e) Avaliar o desempenho do modelo DSSAT/CANEGRO na simulação da evapotranspiração e transpiração da cana-de-açúcar.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Cana-de-açúcar

3.1.1 Origem e Histórico

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) é originária do sudeste Asiático, na região centrada em Nova Guiné e Indonésia (MOZAMBANI et al, 2006; JAMES, 2004) sendo pertencente à família *Poaceae* (CRONQUIST, 1981). O açúcar, produto da cana-de-açúcar, teve como início da produção a China, onde foram encontrados registros com mais de 8.000 anos, atingindo posteriormente a Europa, a África e as Américas, incluindo o Brasil (JAMES, 2004).

No Brasil, a cana-de-açúcar é cultivada a mais de cinco séculos, logo após o descobrimento do país. Inicialmente no Nordeste do país para a produção de açúcar para a exportação, principalmente para a Europa, sendo os Estados de Pernambuco e Paraíba os principais produtores na época. Entretanto, após a crise de 1929, a cultura começou sua grande expansão em São Paulo, atingindo mais de 50% da área de cultivo do país (CANABRAVA, 2005; CORTEZ, 2010).

Em 1933, foi criado o Instituto do Açúcar e Alcool (IAA), para regular a produção interna e desenvolver pesquisas sobre a cultura. Com a crise do petróleo, em 1973, teve início o Proálcool (Programa Nacional do Alcool), objetivando a inserção do álcool na matriz energética brasileira. Nesta época ocorreu o início da produção de veículos movidos a etanol, atingindo seu pico em 1985 quando a maior parte dos veículos fabricados no país eram movidos com este biocombustível. Posteriormente com a redução dos preços pagos aos produtores, ocorreu a falta do combustível no mercado, comprometendo a credibilidade do setor (MARIN, 2014).

3.1.2 Aspectos socioeconômicos

Durante a última década a produção de biocombustíveis ganhou importância em decorrência de fatores econômicos, sociais e ambientais. A maior parte do etanol produzido no mundo é proveniente do milho (Estados Unidos) e de cana-de-açúcar, no Brasil (WACLAWOVSKY et al., 2010). Desde a década passada, o Brasil destacou-se pelo grande

potencial para cultivos voltados à energia, chegando a 596 usinas sucroalcooleiras operando em 2010 (Figura 1). Porém, com a crise econômica de 2008, que se propagou para o setor canavieiro, ocorreram diversas recuperações judiciais e fechamentos definitivos de algumas unidades produtoras (MARIN, 2014).

Figura 1 – Distribuição espacial das usinas sucroalcooleiras e de biodiesel no Brasil em 2010 (MARIN, 2014)

Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2014) a área de cana-de-açúcar teve uma expansão em torno de 20% na safra 13/14, chegando a 363 milhões de toneladas. Do total de colmos industrializados, 46% foram destinados à produção de 41 milhões de toneladas de açúcar e 54% da produção foram destinados à produção de etanol. Como meio de comparação, em 2013, foram comercializados mais de 2,7 milhões de veículos no Brasil. Praticamente 90% deles eram movidos a etanol ou bicomcombustíveis (ANFAVEA, 2014) demonstrando a importância da cultura da cana-de-açúcar no Brasil, mesmo à face da crise que se instala no setor atualmente.

O etanol é reconhecido como combustível renovável, com grande potencial para o setor sucroalcooleiro do Brasil que, por sua vez, tem sido reconhecido mundialmente pelo seu

programa de energia renovável baseado na cana-de-açúcar e isto tem atraído investimentos internos e externos para o país (GOLDEMBERG, 2007), sendo que os principais destinos das exportações brasileiras de etanol são a Coreia do Sul (19,9%), Estados Unidos (13,9%) e Japão (13,8%), e com relação ao açúcar, os principais destinos foram a Rússia, Índia e Irã (12,5%, 8,3% e 5,7% respectivamente) (MARIN, 2014).

Manzatto et al. (2009) indicaram as melhores áreas para expansão da cultura da cana-de-açúcar no Brasil, conciliando as áreas com melhor potencial produtivo por meio de critérios ambientais e de regulação da mudança do uso do solo e, neste estudo, foram identificados em torno de 44 milhões de hectares aptos à expansão da cana-de-açúcar no Brasil (Figura 2), em áreas com clima e solo favoráveis, declividade menor ou igual a 12%, excluindo-se os biomas Amazônico e Pantanal. Mesmo com estas condições comerciais desfavoráveis para a cultura da cana-de-açúcar, o Brasil ainda apresenta um elevado potencial para seu cultivo e expansão, assegurando-se todas as condições ambientais e sociais na implantação de novas áreas (MARIN, 2014).

Figura 2 – Áreas aptas ao cultivo da cana-de-açúcar no Brasil segundo o Zoneamento Agroecológico da cana-de-açúcar (MANZATTO et al., 2009)

3.1.3 Morfologia

A cana-de-açúcar é uma gramínea tropical perene, que se desenvolve em forma de touceiras com perfilhos em sua base. A parte aérea é composta por colmos, folhas, inflorescências e sementes, enquanto que a parte subterrânea é formada pelas raízes e rizomas, estes formados por nós, entrenós e gemas, responsáveis pela formação dos perfilhos da touceira (JAMES, 2004; MOZAMBANI et al., 2006).

O perfilhamento da cana-de-açúcar origina-se a partir do colmo primário, sendo esta uma planta independente e autônoma. Os perfilhos possuem raízes, colmos e folhas próprios,

havendo, porém uma alocação de nutrientes entre os perfilhos da mesma touceira, que podem ser descritos como perfilhos primários, secundários, terciários e assim por diante (JAMES, 2004; RIPOLI, 2006).

A distribuição das raízes declina de forma exponencial à medida que ela vai se aprofundando, com valor máximo de densidade de aproximadamente 5 cm cm^{-3} . É um sistema radicular altamente ramificado do tipo fasciculado, em que 85% das raízes se encontram nos primeiros 50 cm de profundidade sendo 60% nos primeiros 20-30 cm (SEGATO et al., 2006). O desenvolvimento das raízes é contínuo, com uma taxa de renovação radicular regida pelo perfilhamento, o que é importante para se ajustar a mudanças nas condições ambientais, sendo que o crescimento e a distribuição das mesmas variam com a idade da planta e cada perfilho desenvolve seu próprio sistema radicular (JAMES, 2004).

As raízes da cana-de-açúcar podem ser divididas em três categorias diferentes: raízes superficiais, responsáveis pela absorção de água e nutrientes; raízes de suporte, que dão sustentabilidade às plantas; e raízes profundas, que podem chegar a 6 metros de profundidade e são importantes para absorção de água em épocas de seca, demonstrando a capacidade de sobrevivência da cultura a condições de escassez de água (JAMES, 2004; SMITH, 2005). Laclau e Laclau (2009) reportaram crescimento radicular atingindo 4,25m e 4,70m em solos irrigados e não irrigados, respectivamente.

O colmo da cana-de-açúcar é uma haste sem ramificações, com secção transversal aproximadamente circular, diferenciada em segmentos compostos por um nó. Em cada nó, há uma gema lateral situada junto à inserção foliar contendo primórdios radiculares e anel de crescimento, e um entrenó, de 15 a 25 cm de comprimento, dependendo das condições meteorológicas experimentadas pela planta, quando ocorre o acúmulo de sacarose (Marin et al., 2009). O colmo representa a parte econômica do cultivo da cana-de-açúcar e também é utilizado como forma de propagação no plantio de novas áreas da cultura, ou em reformas de canaviais.

Os entrenós imaturos localizados na região do colmo com folhas verdes são fibrosos, com altas concentrações de hexoses e baixa concentração de sacarose. Durante o crescimento, o teor de sacarose é maior nos entrenós basais e menor conforme se aproxima do ápice da planta. Os entrenós, radialmente, possuem um teor de fibra mais elevado na periferia e em menor teor no centro. Assim sendo a estrutura mecânica do colmo é fundamentalmente como um “tubo”, e os mesmos apresentam diversas formas que são utilizadas como parte da diferenciação entre as variedades (JAMES, 2004).

Durante o ciclo da cultura, ocorre um período de produção intensa de colmos, com pico entre 3º e 5º meses após o plantio de cana-de-açúcar de “ano e meio”, mas em seguida 50% destes morrem. A população se estabiliza perto dos 9 meses de idade (BULL, 1975). Ao serem descartados durante o processo de competição, não constituem mais a matéria viva e, portanto, não consomem mais energia pelo processo respiratório (BARBIERI, 1993).

A folha da cana-de-açúcar é constituída de bainha, que liga a folha ao colmo da planta na base dos nós, e da lâmina foliar, onde ocorre o processo de transpiração vegetal, respiração e fotossíntese, sendo a coletora de energia do meio externo (JAMES, 2004). O ciclo de morte e substituição das folhas ocorre durante todo o período de desenvolvimento da cultura, porém o número médio de folhas permanece constante em torno de 9 a 13 folhas vivas por colmo, dependendo da variedade utilizada (VAN DILLEWIJN, 1952; INMAN-BAMBER, 1991; NASSIF et al., 2012).

Apesar de não apresentar benefício para o cultivo comercial por causar um processo chamado de isoporização do colmo, as plantas de cana-de-açúcar emitem inflorescência quando estimuladas. Berding et al. (2005) consideram que as condições para a ocorrência do florescimento são temperatura noturna acima de 21°C e tendência de redução do fotoperíodo. Além do fotoperíodo e da temperatura do ar, a boa disponibilidade de água no solo também é favorável ao florescimento (ALFONSI et al., 1987).

3.1.4 Crescimento e desenvolvimento

As diferentes fases da cultura da cana-de-açúcar são resultantes da ação genética e do ambiente, sendo as principais fases tanto para a cana-planta quanto para a cana-soca: brotação, perfilhamento, crescimento e maturação, representados na Figura 3. Para cada uma destas fases a cana apresenta diferentes exigências climáticas, sendo que alguns cultivares são mais exigentes do que outros (BRAY, 1980).

Figura 3 - Fases do desenvolvimento da cana de açúcar e respectivas unidades térmicas para o desenvolvimento de cada fase para temperatura base de 16°C (GASHO e SHIH (1983), apud MARIN, 2014)

O cultivo da cana-de-açúcar apresenta basicamente dois ciclos de produção. O ciclo de cana-planta, que se inicia com o plantio do colmo da cultura em área de reforma ou áreas novas (Figura 4 a), com posterior brotação e emergência (Figura 4 b), seguida pelo início do perfilhamento e crescimento das touceiras (Figura 4 c e d), pico do desenvolvimento (Figura 4 e) e maturação, seguido da colheita (Figura 4 f e g). A partir da colheita, inicia-se o ciclo de cana-soca com a brotação das gemas que ficaram após a colheita (Figura 4 h) e seguindo a partir deste ponto como a cana-planta, até a renovação do canavial (CHEAVEGATTI-GIANOTTO et al., 2011). As soqueiras da cana-de-açúcar têm um desenvolvimento semelhante ao observado na cana planta, com diferenças específicas no processo de enraizamento e brotação da soca e principalmente com queda de produtividade em relação à cana-planta devido à compactação e queda de fertilidade do solo causado pelo uso contínuo com a cultura da cana e a utilização ineficiente de fertilizantes (MARIN et al., 2009).

Figura 4 - Ciclo fenológico da cana-de-açúcar. a) colmos de mudas para plantio; b) início da brotação e enraizamento; c) início do perfilhamento; d) crescimento e pico de perfilhamento; e) início da maturação; f) maturação da cultura; g) colheita; h) brotação de soqueiras (adaptado de CHEAVEGATTI-GIANOTTO et al., 2011).

Segundo Marin et al. (2009) a temperatura do ar é considerada um dos fatores mais importantes para o desenvolvimento da cana-de-açúcar, sendo considerado como ótimo para seu desenvolvimento entre 20°C e 30°C. O crescimento torna-se nulo quando a mesma fica inferior a 16°C ou superior a 38°C. Para o crescimento das raízes, James (2004) considera que o mesmo é afetado diretamente pela umidade e temperatura do solo, sendo que temperaturas abaixo de 18°C retardam o desenvolvimento radicular e seu crescimento é incrementado progressivamente até temperaturas em torno de 35°C.

O processo de brotação inicia-se a partir de 7 a 10 dias após o plantio e geralmente perdura por até 35 dias, quando há a emissão dos primórdios radiculares e de brotação

primária, seguida das brotações secundárias que resultam no início do perfilhamento (Figura 5). Nesta fase o consumo de energia provém da degradação das substâncias de reserva do tolete. Conforme a equação $C_6H_{12}O_6 + 6O_2 = 6CO_2 + 6H_2O + \text{ENERGIA}$, a planta utiliza-se de O_2 para a quebra dos carboidratos, lipídeos e proteínas para produzir a energia necessária a biossíntese (SEGATO et al, 2006) podendo ser modificada por fatores ambientais externos e internos (PARANHOS, 1987). Esta fase é influenciada pela qualidade da muda, ambiente de produção, época e manejo do plantio (RIPOLI et al., 2006). Marin (2014) descreveu que os toletes da cana-de-açúcar respondem à temperatura do ar para brotação, entre 19°C e 43°C, sendo uma faixa ótima entre 32 e 37°C.

Figura 5 - Representação da sequência de brotação e emissão dos primórdios radiculares presentes no colmo utilizado para o plantio da cultura da cana-de-açúcar. Adaptado de van Dillewijn (1952)

A emergência é o evento que aparece na sequência da brotação e se dá quando as folhas atingem a superfície do solo e passam a ser visíveis (MARIN, 2014). É uma característica genética. No entanto, dentro da mesma variedade, há variação de acordo com a idade da muda, diferença da idade da gema, grau de umidade do tolete, concentração de açúcares e nutrientes minerais, sendo que algumas variedades apresentam baixa emergência a partir do tolete, mas mostram ótimos resultados no ciclo de cana-soca (SEGATO et al, 2006),

sendo influenciada por fatores ambientais externos e internos (gema saudável) (PARANHOS, 1987). Marin et al. (2011) e Marin et al. (2012) observaram que as variedades brasileiras de cana-de-açúcar (RB72454, RB867515 e SP83-2847) têm menor exigência térmica para a emergência (em torno de 450°C d), o que pode representar cerca de 20 dias após o plantio, nas épocas mais quentes do ano na região Centro-Sul brasileira. Segundo Barbieri et al. (1979) a temperatura base para a emergência é de 21°C, sendo 32°C considerada ótima nesta fase. Keating et al. (1999), porém, indicaram que 9°C é a temperatura base para a cultura da cana-de-açúcar, semelhante ao apresentado por Singels et al. (2008) em que os autores ditam que a temperatura base para a emergência da cultura é de 10°C.

O perfilhamento ocorre após 20 a 30 dias do início da brotação inicial do colmo primário (SEGATO et al, 2006) e pode chegar a até 120 dias, sendo um processo de emissão de colmos ou hastes por uma mesma planta, os quais recebem a denominação de perfilhos. Nesta fase Suguitani (2006) afirma que a temperatura ideal está entre 27°C e 32°C, mesma faixa descrita por van Dillewijn (1952), que apontou a temperatura do ar como variável determinante, sendo favorecido na faixa dos 30°C. Temperaturas abaixo de 5°C e acima de 45°C paralisam o processo. O perfilhamento é lento nos primeiros meses após o plantio, sendo mais intenso à medida que as condições climáticas tornam-se favoráveis (SUGUITANI e MATSUOKA, 2001) chegando ao pico e início da queda no número de perfilhos após 500 graus-dia (GD) e a estabilização ocorre após 1200 GD, devido à competição entre os perfilhos pelos fatores de crescimento, considerando uma temperatura base de 16°C (INMAN-BAMBER, 1994). Segundo Segato et al. (2006), na fase de máximo perfilhamento, algumas variedades de cana-de-açúcar podem ter 25 ou mais colmos por touceira (SINGELS e BEZUIDENHOUT, 2002). Nassif et al. (2012) estudaram cinco variedades de cana-de-açúcar e encontraram picos de perfilhamento entre 16 e 19 perfilhos por metro quadrado com estabilização dos mesmos em torno de 9 perfilhos por metro quadrado, demonstrando que nas variedades brasileiras o mesmo ocorre de forma menos intensa quando comparados às variedades sul-africanas.

A radiação solar é de fundamental importância no processo de perfilhamento, tanto pela sua intensidade como pela sua duração, pois sabe-se que a auxina é produzida no meristema apical da planta, deslocando-se por toda cana-de-açúcar, atuando na regulação do crescimento e inibindo o desenvolvimento das gemas laterais, o que está intimamente relacionada com a inibição da formação de novos perfilhos. Isso não ocorre com o aumento da intensidade radiativa na base do colmo, em que o fluxo deste hormônio é reduzido nesta região, reduzindo assim a dominância apical e incrementando a atividade de perfilhamento

(ZHOU et. al., 2003). O contrário ocorre quando a intensidade radiativa na base do colmo diminui, resultado do intenso fechamento da cultura e aumento do índice de área foliar, o que sinaliza para a planta que a área está suficiente ocupada pela cultura e o perfilhamento pode ser reduzido (BEIZUIDENHOUT et al., 2003).

A fase inicial do desenvolvimento da parte aérea da cana-de-açúcar pode ser dividida em três etapas: 1) fase inicial, em que o crescimento é lento (até 200 dias após plantio DAP); 2) a fase de crescimento rápido (dos 200 aos 400 DAP) quando 75% da fitomassa total é acumulada e; 3) fase final de crescimento lento (dos 400 aos 500 DAP) que corresponde a 11% da fitomassa total (MACHADO et al., 1982). Gava et al. (2001) também dividiram o ciclo da cana-de-açúcar em três fases sendo a primeira fase de 0 a 60 dias após a colheita (DAC) quando ocorre o acúmulo de aproximadamente 6% da matéria seca total da parte aérea. A segunda fase geralmente vai de 60 a 210 DAC, quando a taxa de crescimento é mais elevada, com acúmulo de aproximadamente 81% da matéria seca total, e a terceira fase, que vai de 210 a 299 DAC, quando o acúmulo de matéria seca é em torno de 13 % e é a fase de ocorrência da maturação da cultura. Segundo Inman-Bamber et al. (2002), a fração da biomassa pertencente ao colmo aumenta conforme ocorre o aumento da biomassa total, sendo que esta fração é nula antes do início do crescimento do colmo, atingindo seu valor máximo quando ocorre a maturação da cultura, sendo esta fração diretamente afetada por estresse hídrico, temperatura e cultivar. Keating et al. (1999) considera como constante o valor de 70% para fração do colmo na planta colhida, já em literatura podem-se encontrar valores entre 59% a 73%.

Allison et al. (2007), observaram que a cana-de-açúcar cresce mais lentamente em comparação com outras espécies C4, tanto nas fases iniciais como também no final do ciclo, sendo que a taxa de produção de folhas responde menos à temperatura do ar do que outras espécies tropicais similares.

Durante o desenvolvimento vegetativo, o acúmulo de sacarose é pequeno, uma vez que a demanda por fotoassimilados disponíveis é grande por parte dos órgãos em crescimento. O acúmulo máximo de sacarose só ocorre quando a planta encontra condições restritivas ao seu crescimento, chegando ao estágio de maturação, quando temperaturas mais baixas auxiliam no processo de concentração de sacarose do colmo, podendo substituir a deficiência hídrica como fator determinante do início do processo (MARIN et al, 2009). Quando não ocorre a redução da temperatura, necessariamente deve ocorrer uma seca moderada para reduzir a elongação do internódio, resultando no aumento do teor de sacarose nos colmos (SCARPARI, 2007). De forma geral, conclui-se que em condições favoráveis ao rápido

crescimento, o acúmulo de sacarose é pequeno, mesmo nos internódios aptos, e que condições levemente restritivas para o crescimento estimulam o armazenamento de sacarose, dando início ao que se costuma denominar de maturação da cultura (MARIN et al., 2009).

A cana-de-açúcar, entretanto, pode apresentar-se com teor mais elevado de sacarose com apenas alguns meses de idade, bastando para isso que haja algum tipo de estresse, não significando contudo que estará fisiologicamente madura. Esta afirmação é uma demonstração de que apenas idade adulta não significa maturação total (RODRIGUES, 1995). Cardozo e Sentelhas (2013) mostraram que a maturação da cana-de-açúcar está fortemente relacionada com elementos meteorológicos, salientando que em condições favoráveis de radiação solar e fotoperíodo, em conjunto com temperatura do ar e disponibilidade hídrica, grande quantidade de sacarose pode ser acumulada nos colmos. No padrão comercial de manejo da cultura, a taxa de acúmulo de sacarose é maior durante a última fase do ciclo da cana, quando a planta tem a taxa de crescimento reduzida, coincidindo com o período de queda na temperatura e estresse hídrico (MACHADO, 1987).

3.2 Transpiração

3.2.1 Fluxo de seiva

O potencial da água na copa dos vegetais resulta no processo transpiratório. Ocorre fluxo ascendente de água pelo xilema, das raízes para as folhas, sendo este mecanismo conhecido como teoria da coesão-tensão de ascensão da seiva (TAIZ e ZEIGER, 2009). Os mesmos autores descrevem que este mecanismo é desencadeado pelo contato direto que as células do mesofilo na folha têm com a atmosfera pelos espaços intercelulares e, à medida que a água é perdida para a atmosfera, aumenta-se a tensão no sistema gerando assim o fluxo de seiva. Angelocci (2002), também salienta que o fluxo de seiva é resultado da perda de água da cultura pelas folhas, ocasionando uma corrente transpiratória explicada pela teoria da adesão-coesão.

Quando integrado para o período de 24 horas, o fluxo de seiva nas plantas é um indicativo de sua transpiração, desde que não haja deficiência hídrica acentuada, e seu valor depende da área foliar da planta estudada e das características ambientais (Angelocci, 2002). Existem alguns métodos para medir o fluxo de seiva nas plantas como: uso de traçadores químicos e isotópicos; método do pulso de calor, que consiste na medida do tempo de deslocamento de um pulso de calor até uma distância conhecida acima do ponto de

fornecimento de calor no caule, sendo este pulso usado como marcador da seiva; método da sonda de dissipação térmica, conhecido como Granier ou fluxímetro radial, desenvolvido por Granier (1985), baseado na introdução de duas sondas espaçadas no sentido longitudinal à distâncias variáveis e, no interior de cada uma, insere-se um termopar que permite a medida da diferença da temperatura entre as sondas (ANGELOCCI, 2002); e um dos mais utilizados que é o método de balanço de calor no caule (MBC) (SAKURATANI, 1981). Este método consiste em avaliar o fluxo de seiva ocorrente nas plantas, por meio da diferença de temperatura axial e radial no caule, com a utilização de uma resistência para aquecimento do caule da mesma. O método vem demonstrando bons resultados em diversas culturas por ser um método absoluto e não invasivo, que dispensa procedimentos de calibração (MARIN et al. 2008).

O princípio do MBC é simples, consistindo no fornecimento de um fluxo de calor a um segmento do caule ou colmo e na determinação de como o mesmo é dissipado, como fluxos condutivo axial, radial e convectivo, sendo este último devido à transpiração da cultura, além de considerar um possível armazenamento (RIGHI, 2004). Segundo o mesmo autor, o MBC apresenta algumas fontes de erros, que precisam ser consideradas. Um dos problemas mais importantes a carga radiante sobre o sensor. Este problema específico pode ser resolvido quando adiciona-se uma folha de alumínio com a finalidade de reflexão das ondas curtas que incidem no local de medida (GUTIÉRREZ et al, 1994; RIGHI, 2004). Angelocci (2002) também descreve que, ao se trabalhar com o método de fluxo de seiva por balanço de calor, deve-se ter precauções com o isolamento elétrico das junções, garantia de um bom contato térmico entre o sensor e o caule (colmo) da cultura avaliada, bom isolamento contra flutuações da temperatura ambiente e a própria carga de energia radiante.

O MBC foi originalmente desenvolvido por Sakuratani (1981) para avaliação de plantas herbáceas com a utilização de soja e girassol e posteriormente simplificado por Baker e Van Bavel (1987) para o uso em sistemas de aquisição de dados e disponibilização da metodologia para o uso por longos períodos consecutivos de tempo. Sakuratani e Abe (1985) testaram o método para cana-de-açúcar com as variedades NCo 310 e F161, concluindo que a metodologia pode medir o fluxo absoluto em uma planta de cana-de-açúcar com erro inferior a 10%. Posteriormente, Chabot et al. (2005) utilizaram o método para a estimativa da transpiração da cultura da cana-de-açúcar no Marrocos para a variedade CP 66-345, aplicando o método em 14 colmos e extrapolando os resultados para o canavial inteiro. Neste caso, os autores encontraram uma variação de 35% em relação ao método de Penman-Monteith.

3.2.2 Condutância estomática e fator de desacoplamento

A transpiração é regulada principalmente pelas células guarda, as quais regulam o tamanho da fenda estomática para atender à demanda fotossintética de aquisição de CO_2 , enquanto minimizam a perda de água para a atmosfera. A transpiração foliar depende do gradiente de concentração de vapor d'água entre os espaços intercelulares das folhas e atmosfera, da resistência à difusão de vapor d'água, controlada principalmente pelos estômatos, e da espessura da camada limite foliar (TAIZ e ZEIGER, 2009).

Diversos fatores ambientais como a radiação solar, temperatura e umidade do ar, pressão parcial de CO_2 no ar e no interior dos estômatos, velocidade do vento são associados com a regulação da abertura dos estômatos, e consequentemente com a condutância estomática ao vapor de água. Evidentemente, fatores da planta também exercem influência e, dentre estes destaca-se a taxa de assimilação de CO_2 , reguladores de crescimento e o estado hídrico da planta (ANGELOCCI et al, 2004). Segundo os mesmos autores, a resposta estomática às variáveis ambientais são complexas, e a quantificação dos efeitos de cada fator é de difícil estimativa em condições de experimento de campo. Em condições favoráveis de água no solo, as trocas gasosas são limitadas pela abertura estomática, em consequência da baixa umidade de ar. Sales et al. (2012) demonstraram que o déficit hídrico reduz o potencial da água na cana, levando ao fechamento estomático, e que em baixas temperaturas a condutância estomática também é reduzida para evitar a desidratação da parte aérea. Este processo foi também descrito por Roberts et al. (1990), como um efeito da redução do suprimento de água fornecido pelas raízes, com efeito sobre o crescimento das folhas, condutância estomática e fotossíntese.

O grau de interação entre o canavial e a atmosfera pode ser demonstrado numericamente pelo fator de desacoplamento vegetação-atmosfera (Ω) (JARVIS e McNAUGHTON, 1985) que quantifica o modo pelo qual as folhas experimentam a atmosfera e controlam as trocas de vapor d'água. Esse fator depende das resistências aerodinâmica (r_a) e estomática (r_s) da cultura e permite conhecer a variação das respostas fisiológicas da cultura aos diferentes estados da atmosfera, especialmente quanto à fotossíntese e eficiência de uso da água. Estudos recentes têm demonstrado que o fator de desacoplamento pode influenciar na demanda hídrica da atmosfera para culturas altamente acopladas. Marin et al. (2005) e Marin e Angelocci (2011) observaram que os valores de K_c variaram conforme a ETo se elevava, como resultado do intenso acoplamento com a atmosfera. Quando uma cultura encontra-se

totalmente desenvolvida, a interação com a atmosfera pode ser induzida pelos fatores aerodinâmicos, resultando em valores mais baixos de Ω . Porém com vento fraco, ocorre um aumento no valor de Ω e, portanto, tendência de desacoplamento planta-atmosfera, preponderando o papel da radiação solar no processo de trocas gasosas neste caso (RIGHI, 2004; PEREIRA, 2004; SILVA, 2009).

Silva (2009) avaliou o acoplamento vegetação-atmosfera para a cultura da cana-de-açúcar no Submédio do Vale do São Francisco e encontrou que, em diferentes épocas do ano, a cultura apresentou os maiores valores de Ω , o que condiz com uma cultura pouco acoplada, em que o termo radiativo é o maior contribuinte para a transpiração da cultura, pouco sofrendo modificações conforme a demanda atmosférica e velocidade do vento.

3.3 Evapotranspiração

Vários autores já estudaram a necessidade hídrica da cultura da cana-de-açúcar, encontrando grande variabilidade nos resultados. Santos (2005), por exemplo, lista alguns trabalhos realizados em diferentes partes do mundo, referentes ao consumo hídrico da cana-de-açúcar, medidos em lisímetro em que a evapotranspiração média variou entre 2,5 e 5,7 mm dia⁻¹. Porém o citado trabalho não especificou as condições ambientais e instrumentais de cada informação. Possivelmente, tal variabilidade deva-se à influência de fatores determinantes sobre a perda de água nos canaviais e que nem sempre são mensurados em estudos sobre consumo hídrico. Um deles é o fator de desacoplamento atmosfera-vegetação, que se mostrou uma variável de forte influência em sistemas agrícolas com cobertura descontínua do terreno (MARIN et al., 2005; MARIN e ANGELOCCI, 2011).

Existem diversos métodos de estimativa da evapotranspiração, sendo alguns dos mais utilizados os métodos micrometeorológicos que estimam o fluxo de calor sensível e fluxo de calor latente. Um dos métodos é o método aerodinâmico que é a estimativa dos fluxos de calor verticais, baseado em medidas da velocidade horizontal do vento em diferentes alturas, já utilizado em cafezal por Marin (2003) e Righi (2004), sendo considerado por estes autores como um método eficiente para a estimativa da evapotranspiração. Outro método bastante utilizado, por ser mais simples de realizar sua estimativa é o Método da Razão de Bowen (BOWEN, 1926), descrito mais detalhadamente a seguir.

3.3.1 Método do Balanço de Energia - Razão de Bowen

O método do balanço de energia - Razão de Bowen (MRB) vem sendo utilizado por diversos autores para a estimativa da evapotranspiração de coberturas vegetais (RIGHI, 2004). O MRB estima o fluxo de calor latente utilizando medidas em diferentes alturas de temperaturas de bulbo seco e úmido, saldo de radiação e fluxo de calor no solo. Segundo Zeggaf et al. (2008) o MRB é considerado bastante robusto para a medida da evapotranspiração, podendo ser favoravelmente comparado com outros métodos, como exemplo, balanço de água no solo, método da correlação de turbilhões e lisímetro de pesagem.

Quando comparado com o método aerodinâmico (MA), o MRB apresenta vantagens por não precisar da medida do perfil do vento, de temperatura e de umidade em mais do que dois níveis e de não necessitar dos valores da rugosidade da superfície (z_o) e do deslocamento do plano zero (d) nos cálculos. Segundo Righi (2004), porém, a principal limitação para o uso do MRB é a existência de bordadura insuficiente, pois sob condições de advecção, a relação de similaridade entre os fluxos de calor latente e sensível é diferente de 1, podendo ocorrer erros durante os cálculos da estimativa de evapotranspiração.

As trocas gasosas entre planta e atmosfera ocorrem na camada limite, que é dividida em camada limite de transição, onde as propriedades são referentes às superfícies a barlavento e à estudada, e a camada limite em equilíbrio com a superfície (camada limite ajustada), onde os fluxos são constantes e particulares às condições locais. A camada limite em equilíbrio pode ainda ser dividida em uma subcamada inercial e, sob esta, uma camada rugosa, a qual é influenciada por fatores como estrutura e geometria dos elementos de rugosidade, espaçamento, ETc. (RIGHI, 2004). Diversos autores utilizam a relação da camada limite ajustada e bordadura (ou “fetch”, do inglês), que é a distância percorrida na direção do vento por uma parcela de ar sobre uma área de interesse, como 1:50 porém, quando o vento se desloca de uma superfície rugosa para uma mais lisa, seria adequado utilizar uma relação de ao menos 1:70 (PEREIRA, 1997) porém, Heilman e Brittin (1998) avaliaram a bordadura para a utilização do MRB, afirmando que pode ser utilizada uma razão de 1:20 a 1:100, dependendo do uso do solo circunvizinho. Segundo Righi (2004) o cálculo da camada limite interna ajustada pode ser feito conforme a equação 1:

$$\delta = 0,1 * z_0^{0,2} * x^{0,8} \quad (1)$$

em que δ é a camada limite interna ajustada (m), Z_0 é função da rugosidade da superfície e x é a distância da bordadura.

Além da camada limite ajustada, a perda de água pela cultura pode ser influenciada pela camada limite foliar, que é responsável pela resistência da folha a perda de água, a qual diz respeito ao microclima foliar, local onde se define o grau de acoplamento entre a folha e a atmosfera (MARIN, 2013).

O método de balanço de energia por meio da razão de Bowen demonstrou ser eficiente para avaliação do consumo hídrico em outras culturas, o que foi verificado em cafezal por Righi (2004) e Marin et al. (2005). Inman-Bamber e McGlinchey (2003) utilizaram o MRB para a avaliação da evapotranspiração de cana-de-açúcar na Austrália para a variedade NCo 376 e encontraram resultados semelhantes aos calculados pelo método da FAO 56. Zeggaf et al. (2008) utilizaram o MRB para a estimativa da evapotranspiração em milharal e evaporação do solo, fazendo da diferença entre as medições, a transpiração da cultura estudada.

No Brasil, existem poucos trabalhos utilizando o MRB em cana-de-açúcar, como de Toledo Filho (2001) que utilizou o método em canavial no estado de Alagoas, encontrando diferenças na utilização do método nos períodos secos e chuvosos, devido à disponibilidade hídrica, demanda evaporativa da atmosfera e cobertura vegetal, e Silva (2009) que avaliou um canavial da variedade RB92579 irrigado no submédio do Vale do São Francisco durante um ciclo da cultura para a avaliação das variáveis micrometeorológicas do canavial, estudo do K_c e acoplamento da cultura com a atmosfera.

3.3.2 Coeficiente de cultivo (K_c)

Com o desenvolvimento de uma cultura, a mesma vai ocupando a área disponível e, nessas condições, ocorre a evapotranspiração da cultura (ET_c) que representa a quantidade de água que deve ser repostada ao solo para manter o crescimento em condições ideais (PEREIRA, 1997). Segundo o boletim da FAO 56 (ALLEN et al., 1998), a ET_c é a evapotranspiração da cultura sob condições padrão, isto é, livre de doenças, bem fertilizada, em que alcança produtividade máxima sob determinadas condições climáticas. As relações entre a ET_c e ET_o ,

determinadas experimentalmente, são chamadas de coeficiente de cultura ou de cultivo (K_c), ou seja, $ET_c = ET_o * K_c$ (ALLEN et al., 1998). Os mesmos autores descrevem o K_c como uma agregação das diferenças físicas e fisiológicas entre a cultura de interesse e a cultura de referência, sendo esta última caracterizada por uma superfície gramada em pleno crescimento e com altura de 0,12 m.

O K_c é variável entre o plantio e a colheita de uma cultura devido às mudanças nas condições climáticas e variação das características da própria cultura ao longo do crescimento e maturação (ALLEN et al., 1998). Em condições úmidas e pouco vento, o K_c torna-se menos dependente dos componentes aerodinâmicos e para a maioria das culturas aproxima-se numericamente da unidade.

Para a cultura da cana-de-açúcar, usualmente utiliza-se o K_c indicado pelo boletim FAO 56 (ALLEN et al., 1998) que é dividido em inicial, médio e final (0,4; 1,25; 0,75 respectivamente). Porém alguns autores encontraram, para um máximo crescimento da cultura da cana-de-açúcar, K_c entre 0,5 e 1,1 (SILVA et al., 2012a; WIEDENFELD, 2004; SOUZA et al., 1999). Inman Bamber e McGlichey (2003) encontraram K_c variando entre 0,5 e 1,4 dependendo da interceptação de radiação do canavial.

3.4 Modelos de crescimento de culturas

Modelos de simulação de crescimento de culturas baseados em processos são ferramentas de elevado potencial para o estudo e entendimento dos processos físicos, químicos e biológicos da interação solo-planta-atmosfera. Servem também para verificar a performance da cultura em diferentes situações (SOLER, 2004). Thornley e Johnson (2000) afirmaram que modelos matemáticos podem contribuir com o aumento do conhecimento e auxílio a aplicações práticas na agricultura. O'Leary (2000) salientou que, devido à complexidade da natureza, os estudos acadêmicos são centrados a pequenas áreas de interesse, no qual gradualmente acumulam-se conhecimentos. Os modelos baseados em processos são, neste sentido, uma opção para descrição do sistema real à longo prazo, por permitir o acúmulo organizado de conhecimento sobre alguma cultura, sintetizado em códigos de computadores.

Muitos modelos de culturas são desenvolvidos para ajudar os pesquisadores a compreender o funcionamento de vários processos dentro do sistema de cultivo agrônômico. Por exemplo, fluxo de água no solo, fotossíntese e crescimento de plantas e balanço de nutrientes são processos normalmente modelados (JAME e CUTFORTH, 1996). Os modelos

de simulação de culturas são considerados ferramentas que contribuem para a melhoria da previsão de safras e monitoramento das culturas, como ocorreu no caso de Liu e Bull (2001), que utilizaram o modelo QCANE para a simulação de biomassa e acúmulo de sacarose em cana-de-açúcar. Também podem ser usados para a estimativa de produtividade com possíveis impactos das mudanças climáticas, conforme demonstrado por Marin et al. (2012). Neste trabalho os autores demonstraram que a cana-de-açúcar do Sudeste do Brasil pode ser favorecida em cenários climáticos futuros, com base em simulações com o modelo DSSAT/CANEGRO.

Os modelos mecanísticos baseiam-se nos processos físicos e fisiológicos que envolvem o crescimento e o desenvolvimento da cultura e, por este motivo, oferecem mais possibilidades para manipulação e melhoria do sistema. Seu conteúdo normalmente aplica-se a uma maior gama de fenômenos, sendo relativamente mais complexos e úteis que os modelos empíricos. Wallach et al. (2001), afirmaram que os modelos mecanísticos tornaram-se cada vez mais importantes nos últimos anos, como ferramentas de ensino e pesquisa, bem como ferramentas de auxílio a tomada de decisão sobre o manejo de culturas.

Boote et al. (1996) consideraram que existem três níveis de uso dos modelos de simulação de culturas: utilizados em pesquisas, em tecnologia de manejo de cultivos e com uso em políticas de planejamento agrícola. Thornley e Johnson (2000), porém separaram os modelos em dois tipos, sendo os de aplicação em pesquisas, que apresentam maior número de parâmetros e tendem a apresentar respostas mais próximas à realidade, e modelos de aplicação prática, normalmente baseados em relações empíricas, resultando em aproximações menos exatas.

Um terceiro ponto de vista, atualmente mais bem aceito pela academia, é a aplicação de mais de um modelo ao mesmo tempo para se minimizar os erros gerados nas simulações (Rosenzweig et al., 2013). Os autores afirmam que para redução na incerteza dos resultados dos modelos seria a utilização de múltiplos modelos, sendo esta uma recente proposta abordada pelo AgMIP, do inglês *The Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project*.

A modelagem agrícola baseada em processos, apresenta diversas aplicações (LISSON et al., 2005): a) para avaliação do impacto do plantio e da colheita sobre a produtividade da cana-de-açúcar, em que os dados podem ser analisados para tomada da melhor decisão sobre melhor época de plantio e colheita; b) consituição de dados de benchmarking dos limites de produção, potenciais e atingíveis, em que o conhecimento dos limites de produção permite o

estudo da produtividade potencial em diferentes regiões; c) melhoria da eficiência do uso da água; d) previsão de produtividade.

3.4.1 Modelagem da cultura de cana-de-açúcar

Estudos vêm sendo realizados para desenvolver e avaliar modelos que reduzam a necessidade de experimentos em campo (INMAN-BAMBER, 1991). Para a cultura da cana-de-açúcar, os modelos de simulação têm aplicações para diversas questões sobre a produção de cana-de-açúcar no que diz respeito a sua bioquímica, agronomia, fisiologia e manejo de pragas, processos de moagem e danos ambientais (O'LEARY, 2000).

Modelos de simulação do crescimento da cana-de-açúcar poderiam simular diferentes cenários e otimizar recursos financeiros e humanos, através do direcionamento de pesquisas do setor, além de aumentar o entendimento dos processos envolvidos no crescimento e produtividade. No Brasil, o uso de modelos de simulação de crescimento ainda não é rotina, porém alguns autores vêm utilizando desta técnica para o melhor entendimento e pesquisa da cultura (MARIN et al, 2011; NASSIF et al., 2012; COSTA et al, 2014; VIANNA e SENTELHAS, 2014; MARIN e JONES, 2014).

Dentre alguns modelos brasileiros, pode-se citar o SIMCANA proposto por Pereira e Machado (1986), que é um modelo matemático-fisiológico do crescimento da cultura, tendo como variáveis de entrada a radiação solar global, temperatura máxima e mínima e umidade relativa do ar. Machado (1981) também apresentou um modelo matemático-fisiológico para simulação do acúmulo de matéria seca na cultura de cana-de-açúcar a partir de informações meteorológicas. Recentemente, Marin e Jones (2014) propuseram um novo modelo para a cultura da cana, que descreve o crescimento e desenvolvimento por meio de algoritmos baseados em processos de fenologia, desenvolvimento do dossel, perfilhamento, acúmulo e particionamento de biomassa, crescimento de raízes e estresse hídrico.

Os principais modelos de simulação de cana-de-açúcar em uso em todo o mundo são o modelo australiano, APSIM-Sugar (KEATING et al, 1999) e o modelo sul-africano DSSAT/CANEGRO (INMAN-BAMBER, 1991). Estes dois modelos, embora desenvolvidos independentemente, têm origens e abordagens semelhantes para simular a fenologia, expansão do dossel, interceptação da radiação, divisão da biomassa acima do solo e relações planta-nitrogênio (LISSON et al, 2005). Recentemente Marin et al. (2013a) avaliaram esses dois modelos quanto aos princípios de funcionamento e concluíram que ambos modelos são capazes de simular com eficiência a fenologia da cultura, o índice de área foliar e a

produtividade da cultura. Ambos, contudo, tendem a subestimar a absorção de radiação pelo dossel da cultura.

O APSIM (Agricultural Production Systems Simulator) inclui uma coleção de modelos organizados em módulos, que podem ser montados de forma específica pelo usuário. Foi desenvolvido para simular processos biofísicos em sistemas de cultivos, em particular onde existe um interesse em resultados econômicos e ecológicos de práticas de gerenciamento em face aos riscos climáticos (KEATING et al., 2003). O APSIM-Sugar representa um modelo de cana que segue o modelo de outras culturas do módulo APSIM, mas as suas características específicas da cana-de-açúcar são definidas em uma tabela de variáveis de entrada (O'LEARY, 2000). Este modelo foi concebido para simular a produção de colmos, produção de sacarose, biomassa vegetal, uso da água, captação de nitrogênio pela cultura e para partição de carbono e nitrogênio para um canavial uniforme, sendo capaz de simular as diferenças da cana-planta e cana-soca e teor de água do colmo (LISSON et al, 2005). Este modelo também faz a simulação da influência de matéria orgânica no solo, conforme demonstrado por Costa et al. (2014), que utilizaram o modelo APSIM-Sugar para a avaliação do manejo de palha e nitrogênio para uma variedade brasileira de cana-de-açúcar.

O modelo DSSAT/CANEGRO foi desenvolvido na África do Sul com o intuito de modelar os processos fisiológicos mais relevantes da indústria açucareira sul-africana (INMAN-BAMBER, 1991). Incluído no conjunto de modelos Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT versão 3.1) (INMAN-BAMBER e KIKER, 1997), e atualizado na versão 4.5 do DSSAT por Singels et al. (2008), o modelo DSSAT/CANEGRO vem sendo aplicado em diversas regiões do mundo para análise e avanço no conhecimento dos sistemas de produção de cana-de-açúcar (O'LEARY, 2000; INMAN-BAMBER et al., 2002; THORBURN et al., 2005). Na Figura 6 observa-se um resumo esquemático de como o DSSAT/CANEGRO se encaixa no quadro do DSSAT.

Figura 6 - Representação diagramática do DSSAT/CANEGRO, como um módulo inserido no DSSAT (NASSIF, 2010 adaptado de SINGELS et al., 2008)

O modelo DSSAT/CANEGRO pode também ser empregado como referência, indicando inconsistências nos modelos empíricos (O'LEARY, 2000). Este tipo de modelo, por basear-se na modelagem de processos, além de permitir a estimativa da produtividade, também permite conhecer como se deu o desenvolvimento da cultura ao longo do ciclo de cultivo, pois considera desde variáveis biométricas até aspectos envolvendo o consumo de água, o balanço hídrico no solo e a ciclagem de nutrientes, notadamente o nitrogênio (JONES et al., 2007). Singels et al. (2008) apresentam as principais características do DSSAT/CANEGRO, baseando-se em descrições fisiológicas do crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar incluindo a fenologia, desenvolvimento do dossel, perfilhamento, acúmulo e particionamento de biomassa, crescimento de raízes, estresse hídrico e acamamento da cultura.

O modelo requer como dados de entrada, parâmetros de solo (capacidade de campo, ponto de murcha e profundidade do solo) e também parâmetros meteorológicos (radiação solar, temperaturas do ar máximas e mínimas e precipitação). Dados de umidade relativa e

velocidade do vento podem ser inseridos, porém não se apresentam como essenciais (JONES et al., 2003). Segundo Nassif (2010) esses conjuntos de parâmetros são subdivididos em três tipos: ecótipos com 31 parâmetros, 20 parâmetros de cultivares e 23 de espécie, porém somente os parâmetros de ecótipo e cultivares devem ser ajustados pelo usuário do modelo (SINGELS et al., 2008).

As principais características do modelo DSSAT/CANEGRO, segundo Singels et al. (2008) são: a emergência do perfilhamento primário é simulada quando um período específico de tempo térmico foi acumulado a partir do plantio (TTPLNTEM) ou do corte (TTRATNEM), o início do crescimento de colmos é simulado quando um período específico de exigência térmica (CHUPIBASE) é atingido a partir do perfilhamento primário. O pico de perfilhamento ocorre após um período de tempo térmico acumulado desde a emergência, através do parâmetro TT_POPGROWTH. Na modelagem, a fase de perfilhamento dura desde a emergência dos primeiros perfilhos até o pico de perfilhamento, enquanto que o crescimento dos colmos ocorre desde o início do crescimento até a colheita. A fase de senescência de perfilhos é modelada após o pico de perfilhamento até a colheita.

3.5 Produtividade de água na cana-de-açúcar

Produtividade de água (PA) é definida como a razão entre a produção de biomassa e a quantidade de água utilizada pela cultura, incluindo-se as perdas por escoamento superficial, percolação profunda e perdas via sistemas de irrigação, sendo que para a estimativa, pode ser considerada a evapotranspiração da cultura (ET_c) como a quantidade de água utilizada (Pereira et al., 2002). Segundo Maschio (2013) diversos autores utilizam o termo eficiência do uso da água (EUA) com sinônimo de PA, contudo EUA condiz com o desempenho da planta (razão entre a taxa de assimilação e transpiração) sendo que PA é sugerido para a análise do desempenho da cultura, como um todo.

Inman-Bamber et al. (1999) observaram que os valores de produtividade de água chegam a 27,5 kg massa fresca m⁻³, salientando que a cultura responde ao incremento de água no sistema de cultivo, chegando a 30% na biomassa e 41% na produtividade de colmos, com incremento de 9% na quantidade de água aplicada. Porém, a produtividade de água depende da variedade, ciclo da cultura (cana planta ou soqueira), condições ambientais e práticas de manejo adotadas (SMIT e SINGELS, 2006).

No Brasil, poucos trabalhos sobre produtividade de água da cultura da cana-de-açúcar foram desenvolvidos. Maschio (2011) avaliou a produtividade de água para 24 variedades de

cana-de-açúcar cultivadas em casa de vegetação, encontrando valores entre 16 e 30 kg MF m⁻².
³. Vianna (2014), simulando a produtividade de 30 municípios por 30 anos em diferentes condições ambientais no Brasil encontrou um valor médio de 12,45 kg MF m⁻³ de produtividade de água.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Caracterização da área experimental

Foram conduzidas duas áreas experimentais na Fazenda Areão, pertencente ao Departamento de Engenharia de Biossistemas, ESALQ / USP (22,67° S; 47,64° O; 530 m), ambas classificadas climaticamente como Cwa (classificação de Koeppen), com diferentes variedades de cana-de-açúcar e em duas épocas diferentes. A primeira, nomeada neste documento como área experimental 1 (AE1), foi plantada com a variedade CTC 12, sendo a cultura de segundo ano (1ª soqueira), plantada em fevereiro de 2010 em linhas duplas com espaçamento de 0,50 m nas linhas e 1,50 m entre as linhas duplas, em solo classificado como Nitossolo Vermelho Eutrófico, conforme Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, EMBRAPA (2006), em área de 0,3 ha. O canavial apresentou irrigação por gotejamento sub-superficial, subdividido em parcelas com a utilização de água e diferentes doses de vinhaça, sendo este o principal objetivo desta área experimental. Os tratos culturais foram realizados conforme práticas convencionais de cultivo da cana-de-açúcar. O primeiro corte foi realizado em fevereiro de 2011 e a colheita em fevereiro de 2012.

Uma segunda área experimental, nomeada neste documento como área experimental 2 (AE2), foi conduzida na safra de 2012/2013 com área total de 2 ha (Figura 7) em solo classificado como Argissolo Vermelho Amarelo Eutrófico apresentando uma mancha em parte da bordadura da área de Cambissolo Háptico. Foi utilizada a variedade RB867515 (mudas cedidas pela Usina Costa Pinto, Grupo Raízen), sendo que a escolha da mesma deu-se pela sua importância no cultivo da cana-de-açúcar no Brasil, perfazendo quase 25% da área total plantada na safra 2012/2013 (RIDESA, 2013). Foi utilizado espaçamento simples, com distância de 1,4 m entrelinhas, sendo o plantio realizado em 16 de outubro de 2012, em média com 9,7 gemas por metro quadrado. O canavial apresentou irrigação plena por meio de aspersão com pivô central, sendo esta controlada por balanço hídrico, para garantir ao menos 80% da capacidade de água disponível (CAD) no solo para a cultura. As atividades agronômicas realizadas na área estão expressas na Tabela 1. Esta segunda área experimental foi conduzida especificamente para pesquisa micrometeorológicas de consumo de água pela cultura da cana-de-açúcar.

Na AE2, o preparo de solo foi realizado no início de outubro e o plantio feito no dia 16 de outubro de 2012, após análise e correção do solo, com aplicação de 800 kg ha⁻¹ de calcário dolomítico, e adubação de 700 kg ha⁻¹ da formulação 04-20-20. Em 10 de dezembro de 2012,

fez-se uma adubação de cobertura com 40 kg ha^{-1} de nitrogênio na forma de Sulfato de Amônio e em 02 de fevereiro de 2013 foi realizada mais uma adubação de cobertura com a formulação 05-25-20 + 1% FTE BR12 com a finalidade de suprimento de micronutrientes na cultura.

Logo após o plantio realizou-se o controle de plantas daninhas por meio da aplicação de herbicidas pré-emergente (Tebutiurum, nome comercial Combine 500 SC) na dosagem de $2,4 \text{ L ha}^{-1}$ e pós-emergente inicial (Ametrina e Clomazona, nome comercial Sinerge EC) na dosagem de 5 L ha^{-1} . A condução da cultura foi realizada com a finalidade de não apresentar nenhum tipo de déficit hídrico, nutricional ou causado por pragas e doenças. A colheita das parcelas experimentais foi realizada entre 13 e 20 de junho de 2013.

Figura 7 – Localização das áreas experimentais (Google Earth, 2014)

Tabela 1 - Atividades realizadas na área experimental do pivô central com a variedade RB867515

Data	Atividade
27 a 19 de agosto de 2012	Subsolagem e gradagem da área
4 de setembro de 2012	Amostragem de solo
25 de setembro de 2012	Aplicação de calcário dolomítico e gradagem
9 de outubro de 2012	Sulcação e adubação de plantio (4-20-20 – 700 kg ha ⁻¹)
10 a 16 de outubro de 2012	Plantio
26 de outubro de 2012	Aplicação de herbicida pré-emergente + pós inicial
11 de novembro de 2012	Controle de formigas cortadeiras
15 de dezembro de 2012	Adubação de cobertura (100 kg ha ⁻¹ de sulfato de amônio)
14 de fevereiro de 2013	Adubação com micronutrientes
31 de maio de 2013	Tombamento do canavial
15 de julho de 2013	Colheita das parcelas experimentais e finalização das medições biométricas
16 de outubro de 2013	Colheita do canavial

Os dados meteorológicos diários foram coletados, para ambos experimentos, durante todo o ciclo da cana-de-açúcar, na estação meteorológica automática localizada na Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, pertencente ao Departamento de Engenharia de Biossistemas, latitude 22°42’30” Sul, longitude 47°38’ Oeste, altitude de 546 metros, distando 2 km em linha reta da área experimental. Os dados coletados foram temperaturas máxima, média e mínima (°C), precipitação (mm), umidade (%), velocidade média do vento à 2m de altura (m s⁻¹), direção do vento (°), radiação global e saldo de radiação (MJ m⁻² d⁻¹).

Para o cálculo da necessidade de irrigação na AE2, foi utilizado o balanço hídrico sequencial em escala diária, conforme Pereira et al. (1997), iniciado em 1 de janeiro de 2012, para normalização do conteúdo de água no solo na data de plantio do canavial. Para o balanço foi utilizada a estimativa de ETo pelo método proposto por Allen et al. (1998) indicado no boletim da FAO 56. A capacidade de água disponível (CAD) utilizada foi de 100 mm para a profundidade de 1 m (Medeiros, 2012). A irrigação foi realizada sempre que o armazenamento hídrico chegava a 80% da CAD, garantindo suprimento hídrico adequado ao objetivo do experimento. Durante o período de condução desta área experimental, foram

realizadas aplicações de lâminas de irrigação por aspersão com a utilização de pivô central, sendo a eficiência de irrigação considerada de 90% conforme teste realizado no caso da instalação do mesmo na área experimental, totalizando assim 248 mm de água efetivamente aplicada na área (Tabela 2).

Tabela 2 - Datas de aplicação da irrigação e respectivas lâminas bruta e efetiva de água, considerando eficiência de irrigação de 90% na Área Experimental 2

Data	Lâminas de Irrigação (mm)	
	Bruta	Efetiva
16/10/2012	30	27
02/11/2012	4	3,6
03/11/2012	5	4,5
06/11/2012	10	9
08/11/2012	12	10,8
12/12/2012	12	10,8
22/12/2012	6	5,4
27/12/2012	20	18
20/02/2013	21	18,9
07/03/2013	25	22,5
27/04/2013	25	22,5
28/04/2013	25	22,5
10/05/2013	12	10,8
13/05/2013	22	19,8
24/05/2013	19	17,1

4.2 Análises biométricas e tecnológicas

A biometria e análises tecnológicas foram realizadas somente na AE2. Foram demarcadas 5 parcelas, cada uma delas contendo 4 linhas de 5 metros (Figura 8), totalizando 20 metros lineares em área de 28 m². As medidas de biometria foram realizadas durante o ciclo (19 de novembro de 2012; 22 de dezembro de 2013; 20 de fevereiro de 2013; 27 de março de 2013; 02 de maio de 2013) conforme Nassif et al. (2013), sendo:

Figura 8 - Representação esquemática de uma parcela experimental

- **Número de perfilhos por metro linear:** foram contados o número de perfilhos por metro linear e posteriormente foi calculado o número de perfilhos por m^2 , conforme equação 2. Estas medidas foram feitas em toda a área demarcada para a coleta de dados biométricos.

$$\frac{\frac{10000m^2}{1,4ml} * \frac{P5}{5ml}}{10000m^2} = \frac{10000m^2}{1,4ml} * \frac{P5}{5ml} * \frac{1}{10000m^2} = \frac{P5}{7} = \text{perfilhos}/m^2 \quad (2)$$

- **Altura de colmo:** para a medida de altura do colmo, foram utilizadas plantas previamente demarcadas para tais medidas, sendo 10 por parcela. A medida constitui em, com uma fita métrica, medir a distância do solo até a inserção da folha +1 (DA SILVA, 2007) como padrão de altura de colmo das plantas.

- **Número de folhas verdes:** Nas plantas marcadas foram feitas contagens do número de folhas verdes totalmente abertas, isto é, com lígula aparente, capazes de realizar fotossíntese. Conforme Figura 9, considera-se como folha verde a lâmina foliar com pelo menos 50% da área fotossinteticamente ativa (Mazzucchelli et al., 1997), sendo que as demais são consideradas como folhas secas.

Figura 9 - Diferenciação entre folhas verdes (FV) e folhas mortas (FM) em cana-de-açúcar (NASSIF et al., 2013)

- **Índice de área foliar de folhas verdes (GLAI):** o índice de área foliar foi medido com o equipamento LAI 2000 (Li-Cor) na altura das folhas verdes (Figura 10). O sistema de medidas constitui-se em 8 pontos diferentes, realizando-se a sequência de uma medida padrão fora da parcela, 4 medidas dentro da parcela em localizações diferentes (na linha de plantio, $\frac{1}{4}$ distante da linha de plantio, na entrelinha, $\frac{3}{4}$ da linha de plantio, distantes de um passo aproximado em 1 metro cada medida). Após é feita mais uma medida padrão fora da parcela e em outra linha de plantio na mesma parcela, realizando mais 4 medidas conforme descrito. Esse método de medições com o equipamento LAI 2000 segue manual do equipamento para culturas em linha. As medições de IAF foram realizadas nas parcelas estudadas dentro da área demarcada para as medidas.

Figura 10 - Subdivisão do dossel de um canavial para medidas de índice de área foliar de folhas verdes (GLAI) e folhas secas (Nassif et al., 2013)

As avaliações tecnológicas foram realizadas no final do ciclo para acompanhamento da maturação da cultura, nas seguintes datas: 26 de março de 2013; 10 de abril de 2013; 02 de maio de 2013; 16 de maio de 2013; 28 de maio de 2013; 18 de junho de 2013; 25 de junho de 2013. Esta última data realizada após a colheita das parcelas, no restante do canavial que ainda não havia sido colhido em sua totalidade. Para tanto, coletou-se 10 colmos consecutivos de cana-de-açúcar, em linhas aleatórias e 3 repetições. Foram realizadas análises de da porcentagem em massa de sacarose contida no caldo (POL) e porcentagem em massa de sólidos solúveis contidos no caldo (Brix) conforme determinado pelo Conselho dos Produtores de Cana-de-Açúcar, Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo - CONSECANA-SP (2006). As amostras foram homogeneizadas e uma massa de 500 g foi utilizada nas análises. As massas fresca e seca foram obtidas através de pesagem em balança analítica de precisão de 0,1g. A extração do caldo foi realizada com prensa hidráulica, com pressão constante de 24,5 MPa por 1 minuto.

Também foi realizada a avaliação de massa fresca e massa seca da cultura. Para isso, foram cortadas 10 plantas seguidas ao acaso, com 3 repetições, em que foram separadas as folhas, ponteiro (palmito) e colmo, e pesadas em seguida, para evitar a perda de água. A avaliação de massa fresca e seca foi realizada nos dias: 07 de janeiro de 2013; 16 de fevereiro de 2013; 22 de março de 2013; 15 de maio de 2013 e 15 de junho de 2013. Após o material foi colocado para secagem em estufa por 5 dias a 80°C (MUCHOW et al., 1994; MUCHOW

et al., 1996a; MUCHOW et al., 1996b; ROBERTSON et al., 1996; WOOD et al., 1996) ou até que o massa fique constante, garantido a total perda de água, e pesadas em seguida. Após a pesagem foram estimados a produtividade em massa seca e fresca do canavial, conforme equações 3 e 4, respectivamente.

$$MF = \left(\frac{Mfa}{10} * perf * 10000 \right) \quad (3)$$

$$MS = \left(\frac{Psa}{10} * perf * 10000 \right) \quad (4)$$

em que MF é massa fresca (kg ha⁻¹) e MS é massa seca (kg ha⁻¹), Pfa é a massa da amostra fresca (kg) e Psa é a massa da amostra seca (kg), *perf* é o número de perfilhos por metro quadrado do canavial.

4.3 Método da Razão de Bowen

Em ambas áreas experimentais foi inserida uma torre onde foram instalados dois psicrômetros de ventilação forçada (MARIN et al., 2001), com diferença de altura de 1 metro entre eles, sendo que ambos estavam localizados sempre na camada limite ajustada do canavial, a 0,5 m acima do dossel, acompanhando o crescimento da planta (Allen et al., 2011). OS cadarços de algodão, utilizados no termopar úmido, foram trocados a cada 10 dias no período mais chuvoso (fevereiro à abril) e a cada 5 dias no período mais seco (maio e junho). Os reservatórios de água dos psicrômetros foram limpos e reabastecidos com água destilada a cada 2 ou 3 dias. Foi instalado um saldo radiômetro a 3 m acima do dossel do canavial e dois sensores de medida de fluxo de calor no solo, localizados na linha e entrelinha do canavial, enterrados a 2 cm de profundidade. Os dados foram coletados por um sistema automático de aquisição de dados, marca Campbell Scientific Inc. (LOGAN, UTAH, EUA), modelo CR3000. As medidas foram realizadas entre os dias 30 de abril de 2011 e 31 de dezembro de 2011 na AE1 e 14 de fevereiro de 2013 e a colheita das parcelas, ocorrida em 20 de junho de 2013 na AE2. Uma bordadura de 85 e 110 metros foi respeitada entre o início do canavial e a torre de medidas nas AE1 e AE2, respectivamente, com a finalidade de obter-se bordadura adequada. Quando os ventos fossem originários de quadrantes onde não ocorresse uma bordadura suficiente, os dados foram descartados.

Com as medidas do saldo de radiação (R_n), fluxo de calor no solo (G), das diferenças de temperatura (ΔT) e da pressão de vapor (Δe) entre os dois níveis, foi determinado o balanço de energia, conforme equação 5 e a evapotranspiração da cultura.

$$LE = \frac{R_n - G}{1 + \beta} \rightarrow ET_c = \frac{R_n - G}{\lambda(1 + \beta)} \quad (5)$$

em que, R_n é o saldo de radiação ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), G é o fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), β é a razão de Bowen, LE é o fluxo de calor latente de evaporação ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) e λ é o calor latente de evaporação calculada por: $\lambda (\text{MJ Kg}^{-1}) = 2,503 - 0,002386 \cdot T(^{\circ}\text{C})$.

Os valores da razão de Bowen (β), foram calculados através da equação 6 para cada intervalo de 15 minutos, com base nos valores de gradientes de temperatura (ΔT) (MARIN et al., 2005).

$$\beta = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad (6)$$

em que γ é o coeficiente psicrométrico, ΔT é a diferença temperatura do bulbo seco, em $^{\circ}\text{C}$; Δe é o gradiente vertical de pressão de vapor do ar.

Conforme Righi (2004), o MRB pode apresentar incoerência em seus valores. Os dados foram avaliados conforme metodologia desenvolvida por Perez et al. (1999) em que os autores descrevem as condições para que os dados coletados apresentem consistência física, evitando assim erros de estimativas causadas por problemas de advecção ou do equipamento (Tabela 3).

Tabela 3 - Condicionais para a avaliação dos dados para o método da razão de Bowen (adaptado de PEREZ et al., 1999)

Energia disponível	Diferença de pressão de vapor	Razão de Bowen	Fluxos de calor
$R_n - G > 0$	$\Delta e > 0$	$\beta > -1$	$\lambda E > 0$ e $H \leq 0$ para $-1 < \beta \leq 0$ ou $H > 0$ para $\beta > 0$
	$\Delta e < 0$	$\beta < -1$	$\lambda E < 0$ e $H > 0$
$R_n - G < 0$	$\Delta e > 0$	$\beta < -1$	$\lambda E > 0$ e $H < 0$
	$\Delta e < 0$	$\beta > -1$	$\lambda E < 0$ e $H \geq 0$ para $-1 < \beta \leq 0$ ou $H < 0$ para $\beta > 0$

Nos períodos em que os resultados apresentaram tal incoerência, interpolou-se a partir dos valores anterior e posterior, desde que não ocorridos em períodos contínuos superiores a 2 horas de dados incoerentes. Nos casos em que intervalos maiores que 2 horas não apresentaram dados consistentes, todo o conjunto de dados do referido dia foi descartado. Os dados foram integrados somente no período diurno, por objetivar-se a escala diária de resultados.

Logo após o ciclo do segundo experimento foi realizada uma análise da resolução do equipamento utilizado, baseado em Righi (2004), em que os dois conjuntos de psicrômetros (seco e úmido) foram deixados em uma sala, nas mesmas condições de temperatura e umidade por 7 dias consecutivos e posteriormente as informações de temperatura do bulbo seco, temperatura de bulbo úmido e pressão de vapor foram avaliadas, comparando-se os dois conjuntos, e o desvio padrão das diferenças das medidas entre os psicrômetros foi considerado como a sensibilidade do equipamento. Como resultado da análise de resolução, tem-se que as diferenças de temperatura ocorridas no campo experimental, com valores igual ou inferior ao desvio padrão, foram assumidas como erro de medida, desconsiderando-se o período de medida nos cálculos da evapotranspiração.

A evapotranspiração de referência ET_o (mm dia^{-1}) foi determinada com o uso do método proposto pelo boletim da FAO 56 (ALLEN et al, 1998), sendo uma metodologia adaptada do método de Penman-Monteith, conforme equação 7:

$$ET_o = \frac{0,408 \cdot S(Rn - G) + \gamma \frac{900}{T_a + 273} u_2 (es - ea)}{s + \gamma(1 + 0,34 \cdot u_2)} \quad (7)$$

em que s é a tangente a curva de pressão de saturação de vapor no ar, Rn é o saldo de radiação ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), G é o fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), T_a é a temperatura média diária ($^{\circ}\text{C}$), u_2 é a velocidade do vento a 2m (m s^{-1}), $es - ea$ é o déficit de pressão de saturação médio diário (kPa) e γ é a constante psicrométrica. O G foi calculado com base na temperatura média dos 3 dias anteriores, conforme equação 8 (WRIGHT e JENSEN, 1972).

$$G = 0,38(T_d - T_{-3d}) \quad (8)$$

em que T_d é a temperatura média do ar no dia e T_{-3d} é a temperatura média do ar nos 3 dias anteriores.

O coeficiente de cultivo (K_c) foi estimado pela razão entre as medidas de ET_c observadas pelo MRB e a estimativa da ET_o , pelo método do boletim da FAO 56.

4.4 Fluxo de seiva por meio do balanço de calor no colmo

A determinação da transpiração pelo fluxo de seiva foi feita pelo método do balanço de calor, com sensores Dynamax Inc. (HOUSTON, TEXAS, EUA). Como constituição básica, esses sensores possuem uma jaqueta térmica para dissipação de calor, de um fluxímetro de termopilha para quantificação do fluxo radial e de junções de termopar de cobre-constantan convenientemente dispostas para medir o fluxo de calor axial por condução no colmo (SAKURATANI, 1981; MARIN et al., 2008).

Foram utilizados 4 sensores Dynamax na AE1 e 3 na AE2, instalados nos colmos da cana-de-açúcar, na região dos entrenós, afim de evitar a brotação das gemas do colmo. Primeiramente foram selecionados entrenós mais cilíndricos, para obtenção de perfeito contato do equipamento com o colmo (Figura 11 A). Em seguida foi feita a retirada da palhada ao redor do mesmo, para facilitação do trabalho (Figura 11 B). Como o colmo da cana-de-açúcar apresenta uma cerosidade, foi feito um lixamento suave para remoção desta cera, porém sem causar nenhuma lesão ao colmo (Figura 11 C). Para garantir um perfeito contato entre o sensor de fluxo de seiva e o colmo, foi feita a colocação de pasta térmica em torno do entrenó escolhido, após o lixamento, diretamente no tecido da planta (Figura 11 D). Em volta da pasta térmica, foi passado filme plástico alimentício e em seguida instalado o sensor de fluxo de seiva no colmo (Figura 11 E e F). Para evitar qualquer interferência da incidência de radiação solar com aquecimento dos sensores nas medições, a área onde o sensor estava instalado foi revestida com papel aluminizado e por cima com uma manta térmica impermeável utilizada em construções civis (Figura 11 G e H). No caso do segundo experimento, houve redução no número de sensores por problemas apresentados em um deles.

Figura 11 - Sequência de instalação dos sensores Dynamax para medidas de fluxo de seiva por meio do balanço de calor sendo: A – escolha do colmo; B – retirada de palhada; C – lixamento; D – utilização de pasta térmica; E – aplicação de filme plástico; F – instalação do equipamento; G – envelopamento com papel aluminizado e H – cobertura com manta térmica

Os cálculos do fluxo de seiva foram baseados no aquecimento de um segmento do colmo por uma fonte de calor (P), sendo que a energia térmica foi dissipada por condução nos eixos axial (Q_i e Q_s) e radial (Q_r) e também por convecção através do fluxo de seiva (Q_f), conforme Figura 12.

Figura 12 - Representação esquemática do princípio de funcionamento do método do balanço de calor, em que P é o calor aplicado ao sensor; Q_s e Q_i são os fluxos axiais de calor para cima e para baixo do sensor respectivamente; Q_r é o calor dissipado radialmente; Q_a é o calor armazenado no segmento de caule amostrado e Q_f é o calor conduzido pela seiva (Marin et al., 2008).

Para a obtenção do fluxo de seiva (FS), foi utilizada a equação 9, conforme Sakuratani e Abe (1985):

$$FS = \frac{P_i - Q_a - Q_r}{dT \cdot c_p} \quad (9)$$

em que, FS é o fluxo de seiva em kg s^{-1} ; P_i é a potência aplicada (W); Q_a ($Q_s + Q_i$) é o fluxo em watts de energia dissipada axialmente; dados pela soma dos fluxos axiais superior (Q_s) e inferior (Q_i); Q_r é o fluxo de energia dissipada radialmente; dT é a diferença de temperatura entre a extremidade superior e inferior do sensor e c_p é o calor específico da água ($4,186 \cdot 10^{-3} \text{ J kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$).

Os fluxos axiais (Q_a) foram calculados conforme equação 10:

$$Qa = Kst * Ac \frac{(\Delta Tb - \Delta Ta)}{\Delta x} \quad (10)$$

em que Kst é a condutividade térmica do colmo, considerada $0,54 \text{ W m}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ (SAKURATANI E ABE, 1985), Ac é a área da seção transversal do colmo (média das plantas de $7,694 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$) e Δx é a distância entre os termopares (3 mm).

Qr foi calculado conforme equação 11:

$$Qr = Kr * \Delta T_{rad} \quad (11)$$

em que Kr é a condutividade térmica do fluxímetro de calor radial e pode ser obtida em condições de fluxo de seiva nulo ou desprezível para cada instalação do sensor, conforme equação 12 (RIGHI, 2004):

$$Kr = \frac{(Pi - Qa)}{\Delta T_{rad}} \quad (12)$$

No presente estudo, a determinação de Kr foi realizada com dados coletados entre as 3 e 5 horas da madrugada, horário considerado com fluxo de seiva zero ou próximo de nulo. A mesma metodologia foi utilizada por Righi (2004) em que o autor utilizou o MBC para estimativa do fluxo de seiva em cafezal irrigado.

Segundo Marin et al. (2008), quando ocorre baixo FS, a diferença de temperatura nos sensores se aproxima de zero, o que pode levar a uma leitura de transpiração excessivamente alta. Devido a esta limitação do método, foi feito um filtro de baixo FS, descrito a seguir (Van Bavel, 1999, apud Marin, et al., 2008):

Se $0 \leq Q_f < 20\%$ de P

e $\Delta T < \Delta T_{\text{mínimo}} (0,75^{\circ}\text{C})$, então faça FS = 0

Uma segunda parte do filtro utilizado é:

Se $Q_f < 0$, então faça FS = $0,00001 \text{ g s}^{-1}$ ou $0,036 \text{ g h}^{-1}$

Foram estimadas a transpiração por colmo ($\text{L colmo}^{-1} \text{ dia}^{-1}$), integrando-se o resultado do FS para todo dia. Posteriormente, com a área foliar de cada colmo, foi feita estimativa da

perda de água por metro quadrado de folha por dia e, multiplicando-se este último valor pelo IAF da área em questão, foi encontrado o consumo de água pela cultura em mm. A área média de folhas de cada colmo foi de $0,34 \text{ m}^2 \text{ planta}^{-1}$ para ambas áreas experimentais.

4.5 Trocas Gasosas

Um analisador de gás por infravermelho (ADC) (IRGA do inglês *Infra Red Gas Analyser*) foi utilizado para a determinação da condutância estomática à difusão de vapor (gs), taxa de transpiração (E), taxa de fotossíntese (A), temperatura da folha (Tf) e radiação fotossinteticamente ativa incidente nas folhas (Qleaf).

As medidas foram realizadas na AE2 em 10 plantas escolhidas aleatoriamente dentro do canavial, sempre ocorrendo na folha +1. Durante as medidas, as mesmas folhas foram utilizadas para todos os horários durante o dia. As medições foram realizadas no período das 9 horas até o escurecer dos dias, conforme Tabela 4, com a finalidade de obtenção de curvas diárias de resposta da cultura em épocas diferentes.

Tabela 4 - Data e horários das medidas realizadas com o IRGA no canavial

Data	Horário das medidas
28/02/2013	9:00; 10:30; 12:00; 14:00; 15:30; 17:00; 18:00
19/03/2013*	9:00; 10:30; 12:00; 14:00; 15:30; 17:00
09/04/2013	9:00; 10:30; 12:00; 14:00; 15:30; 17:00; 18:00
14/05/2013**	9:00; 10:30; 12:00; 14:00; 15:30; 17:00
04/06/2013**	9:00; 10:30; 12:00; 14:00; 15:30; 17:00

*medida não realizada as 18:00 por motivo de início de chuva

**medida não realizada as 18:00 pelo início do período noturno

Os valores de gs foram transformados em resistência estomática (rs) e foi realizada a estimativa da resistência aerodinâmica para o canavial (Equação 13), e posteriormente calculado o fator de desacoplamento (Ω).

$$ra = \frac{\ln\left[\frac{(z-d)}{zo}\right]^2}{k^2 * u(z)} \quad (13)$$

em que r_a é a resistência aerodinâmica, z é a altura de medida do vento (m), d é o deslocamento do plano zero, z_0 é a altura da rugosidade da superfície, k é a constante de Von Karman (0,41) e $u(z)$ é a velocidade do vento na altura z .

A estimativa de deslocamento do plano zero (d) e do comprimento da rugosidade (Z_0) foram realizadas conforme a altura do dossel da cultura (h) pelas equações 14 e 15, respectivamente (Rosenberg et al., 1983).

$$d = \frac{h^{0,979}}{1,425} \quad (14)$$

$$Z_0 = \frac{h^{0,997}}{7,638} \quad (15)$$

Conforme Jarvis (1985), o fator de desacoplamento (Ω) da vegetação-atmosfera foi calculado por meio da equação 16:

$$\Omega = \frac{1}{1 + \left[\frac{\gamma}{(s + \gamma)} * \frac{rs}{ra} \right]} \quad (16)$$

em que rs é a resistência estomática à difusão de vapor ($s \text{ m}^{-1}$), ra é a resistência aerodinâmica do canalial ($s \text{ m}^{-1}$), γ é a constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$) e s é a tangente à curva de saturação de vapor ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$).

A área experimental não possuía torre com perfil de velocidade do vento para uma análise mais detalhada da resistência aerodinâmica. Portanto foi utilizada uma estimativa de vento a 10 m do solo, com base no vento a 2 m, medido na estação meteorológica da ESALQ. Para esta estimativa, foi obtida uma relação entre o vento médio diário da estação convencional da ESALQ a 10 m e o vento médio diário na estação automática a 2 m, resultando na equação 17:

$$u_{10m} = \frac{u_{2m}}{0,6073} \quad (R^2=0,77) \quad (17)$$

em que u_{10m} é a velocidade do vento na altura de 10m com relação à superfície do solo e u_{2m} é a velocidade do vento medida na estação meteorológica a 2m da superfície do solo.

4.6 Simulações do consumo hídrico, crescimento e desenvolvimento

Com o objetivo de checar os algoritmos relacionados à transpiração e evapotranspiração, avaliou-se o desempenho do modelo DSSAT/CANEGRO em comparação aos dados de campo. Os dados de evapotranspiração do canavial e a transpiração da área experimental com a variedade RB867515 foi inserido no modelo de crescimento de cana-de-açúcar, DSSAT/CANEGRO. Este procedimento teve por finalidade de comparação da resposta do modelo e os valores encontrados em campo. Inicialmente foram inseridos os dados biométricos do canavial estudado, com a devida calibração prévia para a variedade RB867515, conforme Tabela 5 (MARIN et al., 2013a).

Como o modelo utiliza dois métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o), FAO 56 (ALLEN et al., 1998) e Priestley-Taylor (1972) foram feitas simulações para avaliação de ambas metodologias de evapotranspiração, comparando-os com os dados observados em campo, estimados pelo MRB. Singels et al. (2008) sugerem que os dados diários mínimos de entrada para o modelo DSSAT/CANEGRO devem ser de temperaturas máxima e mínima, precipitação e mínima umidade relativa do ar. Para obtenção de uma relação entre a evapotranspiração e a demanda atmosférica, utilizou-se primeiramente o dado de umidade relativa mínima do ar, e posteriormente foram inseridos dados estimados da temperatura do ponto de orvalho, para cada dia, utilizando-se a temperatura máxima e a umidade relativa mínima.

Análise-se a sensibilidade da evapotranspiração e transpiração do modelo para as variáveis velocidade do vento, radiação solar, umidade relativa e temperaturas máximas e mínimas, atribuindo variações de +10% e -10%, resultando em ET e T relativas, que são compostas pela razão entre o valor padrão e os valores simulados com os parâmetros ambientais modificados.

Com a simulação de todo o ciclo foi utilizada a evapotranspiração da cultura gerada pelo modelo com base na estimativa pela FAO 56 para avaliar o coeficiente de cultivo (K_c) simulado, com base na ET_o calculada por Allen et al. (1998) e posterior comparação com o K_c observado em campo por meio do MRB.

Tabela 5 - Parâmetros de cultivar para o modelo DSSAT/CANEGRO, das cultivares padrão do modelo (NCo 376) e utilizado para a variedades RB867515

Parâmetros	Descrição	Unidades	RB867515	NCo376
PARCEMAX	Eficiência de conversão da radiação	g MJ ⁻¹	11,1	9,9
APFMX	Fração da partição para a parte aérea	fração	0,88	0,88
STKPFMAX	Fração do colmo da biomassa da parte aérea	fração	0,65	0,65
LFMAX	Número máximo de folhas verdes	Folhas colmo ⁻¹	10	12
MXLFAREA	Área da maior folha	cm ²	546	360
MXLFARNO	Número da maior folha	nº	18	14
PI1	Intervalo de filocrono 1 – folhas mais novas que Pswitch	GD	89	69
PI2	Intervalo de filocrono 2 – folhas mais velhas que Pswitch	GD	107	169
PSWITCH	Número da folha quando ocorre a mudança do filocrono	nº	18	18
TTPLNTEM	Graus-dia para emergência da cana-planta	GD	408	428
TTRATNEM	Graus-dia para a emergência da cana-soca	GD	203	203
CHUIBASE	Graus-dia para o início do crescimento do colmo	GD	547	1050
TT_POPGROWTH	Graus-dia para ocorrência do pico de perfilhamento	GD	628	600
MAX_POP	Pico de população de perfilhos	nº m ⁻²	15	30
POPTT16	População final de perfilhos	nº m ⁻²	10	13.3

4.7 Produtividade de água

Após a avaliação do consumo hídrico do canavial estudado na AE2, foi feita a estimativa de produtividade de água baseada na diferença de produtividade com base em massa fresca e massa seca entre as análises biométricas e avaliado o consumo de água da cultura, por meio da evapotranspiração da cultura, resultando em produtividade por volume de água.

Como as medidas de ET_c pelo MRB não foram contínuas desde a data do plantio até a colheita, inviabilizando a avaliação do consumo hídrico acumulado nos períodos, foi utilizada a ET_c simulada pelo modelo DSSAT/CANEGRO após a devida calibração e avaliação para as variáveis de consumo hídrico da cultura. Com base na ET_c gerada pelo modelo, e dados de biomassa da cultura nas datas de biometria e produtividade final, foi estimada a produtividade de água para cada período entre medidas da biomassa e para todo o ciclo da cultura, sendo o resultado apresentado em toneladas de massa fresca ou massa seca a cada 100 mm de evapotranspiração da cultura.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Dados meteorológicos da área experimental e irrigação

No período do experimento com a variedade CTC 12, a temperatura média foi de 21,8°C, variando entre 16,1°C e 29°C (Figura 13 A), com precipitação total de 1456 mm. Ao longo do experimento com a variedade RB867515, a temperatura média foi de 22,7°C, com a média máxima de 30,3°C, média mínima de 16,8°C e precipitação total do período de 1318 mm (Figura 13). A direção predominante do vento foi de sudeste, conforme Figura 14, com 51% dos valores indicando a direção do vento entre 90 e 180°, sendo a informação importante para a caracterização da bordadura a utilizada com o método de balanço de energia da razão de Bowen em ambas áreas experimentais.

Figura 13 - Dados meteorológicos durante o ciclo da cultura entre fevereiro de 2011 e fevereiro de 2012 na área experimental com a variedade CTC 12 (A) e entre outubro de 2012 e outubro de 2013 na área experimental com a variedade RB867515

Figura 14 - Frequência da direção do vento no período dos experimentos, entre 01 de fevereiro 2011 e 16 de outubro de 2013

A irrigação foi realizada sempre que o armazenamento atingia 80% da capacidade de água disponível (CAD), assim disponibilizando água prontamente para a cultura durante o ciclo, garantindo que a mesma não apresentasse estresse hídrico (Figura 15). Não foram aplicadas lâminas maiores que 30 mm devido ao risco de atolamento das rodas do pivô central. Na AE1, apesar do manejo da irrigação para suprimento adequado à cultura, os detalhes do processo de irrigação não estão disponíveis. Por isso, para assegurar que as análises deram-se com suprimento hídrico adequado às plantas, utilizou-se dados micrometeorológicos coletados em até 5 dias após chuvas maiores que 10 mm, descartando-se dados posteriores.

Figura 15 - Disponibilidade de água para a cultura, durante o período experimental 2, em porcentagem da CAD. A linha tracejada representa 80% da CAD

5.2 Biometria e análise tecnológica

A variedade RB867515 apresentou um padrão de crescimento comumente encontrado em cana-de-açúcar, com índice de área foliar das folhas verdes (GLAI) (Figura 10) entre 3 e 4 ao longo do ciclo, sem queda até o final do experimento (Figura 16 A). O perfilhamento observado apresentou pico de 16 perfilhos m^{-2} , estabilizando em torno de 10 perfilhos m^{-2} (Figura 16 B). O colmo emergiu cerca de 70 dias após o plantio (700 graus-dia com temperatura base de $16^{\circ}C$), chegando, em média, a quase 3 m de altura no final do experimento (Figura 16 C). O número de folhas verdes tem um padrão parecido com o de perfilhamento, mas durante quase todo o ciclo da cultura o valor não muda, variando entre 7 e 8 folhas verdes por planta durante todo o ciclo da cultura (Figura 16 D). O padrão de crescimento e desenvolvimento observado neste experimento foi semelhante ao descrito por diversos autores com as variedades brasileiras (FARIAS et al., 2008; NASSIF et al., 2012; SILVA, 2012).

Figura 16 - Variação do índice de área foliar de folhas verdes (A), perfilhamento (B), altura de colmos (C) e número de folhas verdes (D) para a variedade RB867515

Na AE2, como o tempo entre o plantio e a colheita das parcelas foi de 8 meses, a cultura apresentava-se ainda em crescimento ativo quando ocorreu a colheita das parcelas. Tal antecipação deveu-se pelo tombamento de cerca de 80% da área, ocorrido entre 27 e 30 de maio de 2013, principalmente pela elevada massa de colmos, raízes pouco profundas e rajadas de vento de até $10,7 \text{ m s}^{-1}$ nos dias anteriores, quando choveu uma lâmina acumulada de 73 mm (Figura 17).

Figura 17 - Canavial tombado devido à ação do tempo no dia 31 de maio de 2013

No final do ciclo da AE2, foram realizadas amostragens para a condução de análises tecnológicas, com a finalidade de obter-se o teor de sacarose dos colmos. A Figura 18 demonstra que o acúmulo de sacarose na cultura ocorre no final do ciclo, partindo de valores entre 8 e 14 de Brix (porcentagem em massa de sólidos solúveis contidos em uma solução de sacarose quimicamente pura) e entre 4 e 10 de Pol (porcentagem de massa de sacarose aparente contida em uma solução açucarada). Estes valores observados ficaram abaixo do encontrado por outros autores como Silva Neto et al. (2014), que encontraram teores de açúcar para a variedade RB867515 em torno de 12,5% em canavial sem irrigação. Isso pode ser explicado pela colheita precoce do canavial sob irrigação, sem a devida suspensão previa da irrigação para elevação na concentração da sacarose.

Figura 18 - Teores de Pol e Brix da cana-de-açúcar durante o período de maturação, no final do ciclo

No início do ciclo, observou-se que a cultura não apresentava colmos acima da superfície do solo, o que foi observado a partir de fevereiro. Em junho, a cultura apresentou 154,9 t ha⁻¹ de massa fresca de colmos e 30,6 t ha⁻¹ de massa seca (Figura 19 A). O teor de água no colmo da cultura variou entre 90% no início do ciclo e 80% na colheita (Figura 20), decréscimo causado pelo início da maturação do canavial e consequentemente elevação na concentração de sacarose. Com relação às folhas, observou-se que a umidade das mesmas permaneceu em torno de 75% durante o ciclo (Figura 20), com estabilização da massa fresca e seca por volta de março, período coincidente com o pico e estabilização do IAF do canavial e do número de folhas verdes (Figura 19 B). O mesmo padrão foi observado pelo ponteiro do

canavial, que é a zona de crescimento da planta onde fica o meristema apical, com umidade de 95% (Figura 20). A massa dos ponteiros apresentou um crescimento até maio (Figura 19 C), seguido de uma redução com a queda na temperatura.

Figura 19 - Massa fresca (t ha⁻¹) e massa fresca (t ha⁻¹) de colmos (A) folhas (B) e ponteiro (C) do canavial estudado

Figura 20 - Variação do teor de umidade (%) do colmo, folhas e ponteiro do canavial durante o ciclo experimental

5.3 Método da Razão de Bowen

Na avaliação dos psicrômetros, observou-se que a temperatura de bulbo seco (T_s) de ambos conjuntos apresentaram padrão de variação similar (Figura 21) entre 20 e 30°C, com elevada correlação ($R^2=0,997$) (Figura 22 A) e resolução estimada de 0,08°C. Para os termopares úmidos (T_u) houve uma variação entre 16 e 26°C, também similar (Figura 21), porém com uma menor determinação (Figura 22 B), resultando em uma sensibilidade estimada de 0,32°C.

A pressão de vapor (e_a) para os dois conjuntos psicrométricos que variaram entre 1,5 e 3,5 KPa (Figura 21) com coeficiente de determinação de 0,9671 (Figura 22 C), apresentando resolução de 0,07 KPa. Os valores encontrados são mais elevados que os apresentados por Perez et al. (1999) que verificaram resolução de 0,02°C para as temperaturas T_s e T_u , e 0,02 KPa para o déficit de pressão de vapor (Δe) para um conjunto psicrométrico Campbell Sci. Este valores foram também inferiores aos verificados por Zeggaf et al. (2008) que, utilizando um conjunto psicrométrico de bulbo seco e úmido, com ventilação forçada em milho, encontraram resolução para os termopares de 0,2 °C, não tendo avaliado o mesmo para a pressão de vapor. Righi (2004), avaliando psicrômetros similares aos utilizados neste estudo, encontrou resolução de 0,02°C para T_s e 0,06°C para T_u . Este mesmo autor não avaliou a resolução do equipamento para os dados de pressão de vapor d'água. Estes dados indicam que, em caso de gradiente de temperatura de bulbo seco até 0,08°C, o dado pode ser rejeitado. O mesmo ocorre para o gradiente de pressão de vapor, que deve ser rejeitado para valores inferiores a 0,07 kPa. Segundo Perez et al. (1999) mesmo quando os dados estiverem dentro

da faixa de resolução do equipamento, os mesmos podem ser confiáveis se as condicionais da Tabela 3 forem aceitas, neste caso podendo ser utilizados para os cálculos da evapotranspiração da cultura.

Figura 21 - Variação das temperaturas (°C) de bulbo seco e bulbo úmido e da pressão de vapor (kPa) dos dois conjuntos psicrométricos utilizados no experimento, colocados em mesmas condições ambientais de temperatura, pressão atmosférica e umidade do ar

Figura 22 - Relação entre as temperaturas de bulbo seco (A), bulbo úmido (B) e pressão de vapor d'água (C) dos dois conjuntos psicrométricos utilizados na área experimental, sob as mesmas condições ambientais de temperatura, pressão e umidade do ar

Com base em Perez et al. (1999), a avaliação da consistência dos dados dos períodos diurnos e noturnos indicou que 49% foram aceitos e 51% rejeitados para a AE2. Padrão diferente foi observado na AE1, onde aceitou-se 64% dos valores e 36% foram rejeitados. Considerando-se somente os dados diurnos, sem a interpolação para períodos rejeitados de até 2 horas, 76,2% foram aceitos e 23,8% rejeitados na AE1. Na AE2, observou-se 78,4% dos

dados aceitos e 21,6% rejeitados, o que corrobora com Righi (2004) e Silva (2009) que encontraram 73% e 62,1% de aceitação em cafezal e canavial respectivamente. Tais rejeições ocorreram no início e/ou final do dia, quando observa-se a transição de R_n-G de positivo para negativo ou vice-versa, e grande parte devido ao erro dos sensores. Neste períodos, também, o valores absoluto da evapotranspiração são relativamente pequeno.

Durante o período de coleta de dados na AE2, observou-se que o fluxo de calor sensível (H) foi de aproximadamente 13% da energia disponível no sistema (R_n-G) durante o dia (Figura 23 A), variando entre 14,6% no primeiro terço do ciclo estudado (Figura 23 B), 10% no segundo terço avaliado (Figura 23 C) e 14,4% no terço final do período estudado (Figura 23 D). Observando-se o fluxo de calor latente (LE) ao longo de todo período (Figura 24 A), o mesmo representa em torno de 86,4% da energia disponível, variando entre 84,8% no primeiro terço de medidas de campo (Figura 24 B), chegando a 89,3% no segundo terço de avaliações (Figura 24 C) e com 84,8% no terço final de medições (Figura 24 D). Essas altas frações da energia disponível utilizada no fluxo de LE deve-se a alta disponibilidade de água na fase líquida no ambiente resultando assim em um menor fluxo de H no canavial.

Figura 23 - Relação entre o fluxo de calor sensível (H , $MJ m^{-2} 15min^{-1}$) e energia disponível no sistema ($Rn-G$, $MJ m^{-2} 15min^{-1}$) em períodos diurnos de 15 minutos para todo o ciclo estudado (A), no primeiro terço do ciclo (B), segundo terço do ciclo (C) e terceiro terço do ciclo (D) para a AE2

Figura 24 - Relação entre o fluxo de calor latente (LE, $\text{MJ m}^{-2} 15\text{min}^{-1}$) e energia disponível no sistema (Rn-G , $\text{MJ m}^{-2} 15\text{min}^{-1}$) em períodos diurnos de 15 minutos para todo o ciclo estudado (A), no primeiro terço do ciclo (B), segundo terço do ciclo (C) e terceiro terço do ciclo (D) para a AE2

A título de exemplo, tomando-se o dia 16 de fevereiro de 2013 (Figura 25 A), para a AE2, como representativo de um dia sem nebulosidade elevada, observou-se que o G representou uma média de 6,7% de Rn, chegando a picos de aproximadamente 15% no período da tarde. Neste mesmo dia, LE representou em média $80,5\% \pm 10\%$ de Rn, porém no período entre o nascer do sol e as 13h, o valor ficou em 74% e entre as 13h e o final do dia, a média foi para 84%. Já o H apresentou uma média de $14,3\% \pm 7\%$, chegando a 19,6% entre o nascer do Sol e as 13h, e a 11,1% após as 13h. Quando avaliou-se o dia 18 de fevereiro de 2013 (Figura 25 B), quando houve um aumento da nebulosidade após as 13h, observou-se neste horário uma queda acentuada de Rn, e até as 14h o G foi de 5,7% do Rn, permanecendo positivo e representando cerca de 10% da energia incidente no sistema entre as 16 e 17:15h. O fluxo de LE foi de $77,1\% \pm 7\%$ entre o início do dia e as 15:30 quando passou a representar quase 100% da energia disponível no ambiente ($\text{Rn} + \text{G}$) e, consequentemente, o fluxo de H

foi de $16,5\% \pm 8\%$ durante o dia e chegou a 0% com o aumento da nebulosidade e redução da energia disponível.

No dia 25 de março de 2013 (Figura 25 C), com nebulosidade variável ao longo do dia, o fluxo de G foi em média de $4,8\% \pm 1\%$ resultado de uma menor incidência de energia no sistema. Já o fluxo de LE foi de $60,5\% \pm 4\%$ em média, sem grandes variações durante o dia. O H, por sua vez, representou em torno de $34,5\% \pm 5\%$ do saldo de radiação. Quando observa-se os dias 30 de abril de 2011 (Figura 25 D) e 4 de maio de 2011 (Figura 25 E), ambos referentes à AE1, no primeiro observa-se a incidência de nebulosidade às 14 horas, com a redução de Rn, o fluxo de G foi em média de $5\% \pm 3\%$ em ambas datas, sendo que LE foi de $73\% \pm 16\%$ e $65\% \pm 9\%$ e o fluxo de H de entre $25\% \pm 14\%$ e $34\% \pm 8\%$ respectivamente, informações que corroboram com Silva (2009) que mediu o fluxo de LE entre 65 e 72% do período de estudo em canavial irrigado e H médio de 29%. Em cafezal irrigado, Righi (2004) verificou que LE representava de 64 a 80% de Rn. Zeggaf et al. (2008) encontraram na cultura do milho, fluxo de H em torno de 8% da energia disponível, e G sempre menor que 10%, sendo o restante da energia direcionada para o fluxo de calor latente (LE).

Figura 25 - Variação horária do saldo de radiação (R_n , $\text{MJ m}^{-2} 15\text{min}^{-1}$), fluxo de calor no solo (G , $\text{MJ m}^{-2} 15\text{min}^{-1}$), fluxo de calor latente (LE , $\text{MJ m}^{-2} 15\text{min}^{-1}$) e fluxo de calor sensível (H , $\text{MJ m}^{-2} 15\text{min}^{-1}$) para os dias 16/02/2013 (A), 18/02/2013 (B), 25/03/2013 (C) na AE2 e para os dias 30/04/2011 (D) e 04/05/2011 (E) na AE1

5.4 Fluxo de seiva

Durante o experimento na AE2, avaliou-se o fluxo de seiva em três colmos ao longo de duas campanhas de medida. A primeira entre os dias 14 de maio (dia juliano 134) e 30 de maio (DJ 150), e a segunda entre os dias 16 de junho (DJ 167) e 4 de julho (DJ 185), totalizando 36 dias de medições do fluxo de seiva. Para o canal da AE1, foram realizadas medições em 10 dias corridos, com 4 sensores, entre 10 de fevereiro (DJ 41) e 19 de fevereiro (DJ 50).

A Figura 26 apresenta as curvas de medidas dos componentes do método do balanço de calor, considerados nessa análise como uma tentativa de checar a qualidade das medidas (Marin et al., 2008). Como exemplo, tem-se na avaliação da porcentagem da potência fornecida com relação à energia térmica armazenada no colmo (Q_a), fluxo radial de energia

térmica (Q_r) e energia térmica dissipada pela seiva (Q_s) para os dias 168 a 173 do sensor 1 na AE2, verificou-se um padrão de variação uniforme de Q_r de em média 25% no período diurno e 80% no período noturno. Os valores de Q_s também tiveram um padrão uniforme na variação, porém inversos ao Q_r , chegando a nulidade durante o período noturno, demonstrando que durante a noite não ocorreu fluxo de seiva, e a quase 80% durante o período diurno. Já a variável de Q_a apresentou variação entre 3 e 18% da potencia aplicada no sensor, sendo o valor menor durante o dia, com o fluxo de seiva máximo e o maior armazenamento ocorrendo durante a noite, com o fluxo nulo. Este mesmo padrão foi observado para os dados coletados na AE1, com a variedade CTC 12.

Esta avaliação preliminar corrobora com Marin et al. (2008) que realizaram testes em cafeeiro, encontrando o mesmo padrão de dados com Q_r variando entre 20 e 80%, Q_s entre 0 e 80% e Q_a entre 0 e 20%. Este mesmo autor destacou a importância desta avaliação preliminar afirmando que em caso de grande instabilidade em medidas subsequentes pode ser um indicativo de problemas nas medidas, o que pode ocorrer devido à presença de água sobre as junções do termopar, problemas nos sensores utilizados ou presença de um campo magnético de corrente alternada prejudicando o sistema de aquisição de dados, sendo esta avaliação considerada como um primeiro critério para a seleção dos dados a serem utilizados.

Figura 26 - Variação temporal da porcentagem da potência fornecida em relação à energia térmica armazenada no colmo (Q_a), fluxo radial de energia térmica (Q_r) e energia térmica dissipada pela seiva (Q_s), para os dias julianos 168 a 173, do sensor 1, para a área experimental 2, no ano de 2013

Para a determinação do coeficiente de difusividade radial de calor do sensor (K_r), foram utilizados dados entre as 3:00 e 5:00 h, quando o fluxo de seiva teoricamente é nulo. Utilizou-se um valor médio para cada dia de medida, em que, na AE1, nos 5 primeiros dias, a variação foi semelhante exceto para o sensor 3, e a partir deste dia até o décimo dia de medida, o padrão de variação foi parecido, porém com valores diferenciados em cada sensor, variando entre $0,05 \text{ W } ^\circ\text{C}^{-1}$ para o sensor 1 e $0,098 \text{ W } ^\circ\text{C}^{-1}$ para o sensor 4 (Figura 27 A), o que ocorreu devido à diferença de diâmetro entre os colmos, entre 28 e 31 mm.

Na AE2, o padrão de variação foi semelhante para os três sensores, ficando entre $0,035$ e $0,045 \text{ W } ^\circ\text{C}^{-1}$. Porém, no primeiro ciclo de medidas, o sensor 2 apresentou uma maior variabilidade, chegando a $0,075 \text{ W } ^\circ\text{C}^{-1}$ (Figura 27 B). Estes valores de K_r são menores do que os encontrados por Righi (2004) e Marin et al. (2008) com cafeeiro, que verificaram o K_r chegando a $0,18 \text{ W } ^\circ\text{C}^{-1}$. Estes autores, contudo, comentam que além da variação de K_r ao longo do período experimental, existe a influência do tamanho do sensor utilizado no estudo, sendo que quanto maior o diâmetro do sensor, maior o K_r . No presente estudo foram utilizados sensores com 25 mm de diâmetro em ambas áreas experimentais.

Figura 27 - Variação do coeficiente de difusividade radial de calor (K_r) médio e mínimo dos quatro sensores instalados na variedade CTC 12 (S1; S2; S3; S4) (A) e de três sensores com a variedade RB867515 (S1; S2; S3) (B)

Os quatro sensores de fluxo de seiva instalados na AE1 apresentaram taxas de transpiração semelhantes nos dias analisados, variando de 0,23 a 0,50 L colmo⁻¹ para os dias 44 e 49 respectivamente. Estes valores correspondem à transpiração entre 2,16 e 4,71 mm dia⁻¹ sendo que os mesmos são superiores aos encontrados na AE2, com 3 colmos analisados, que variaram entre 0,06 e 0,41 L colmo⁻¹ dia⁻¹ para os dias 177 (26 de junho) e 140 (20 de maio), respectivamente (Tabela 6). Isso corresponde, em colmos com aproximadamente 0,34 m² de folha, a um consumo entre 0,16 e 1,21 L m⁻² folha⁻¹, resultando em uma taxa de transpiração no canavial entre 0,5 e 3,62 mm dia⁻¹. Esta diferença se deu devido à época das medições

realizadas nas áreas experimentais, em que a primeira foi em fevereiro de 2012 e a segunda entre maio e junho de 2013, evidentemente com diferença quanto à disponibilidade de energia no ambiente. Tais valores estão aquém daqueles observados por Chabot et al. (2005) no Marrocos, onde a área experimental estava em um clima semiárido do mediterrâneo com influência oceânica e a cana-de-açúcar teve seu desenvolvimento em lisímetros e apresentou consumo médio de 8 mm dia^{-1} . Os mesmos autores, contudo, inferiram que as medições do fluxo de seiva podem acarretar em uma superestimativa de até 35% na taxa de transpiração. Boehringer et al. (2013) trabalharam com o método de balanço de calor, porém com a inserção de um mini-resistor no centro do colmo, e comparando com medidas gravimétricas, encontraram até $140 \text{ g planta}^{-1} \text{ h}^{-1}$ de transpiração; avaliando a transpiração da cultura em condições de céu nublado e parcialmente nublado, concluíram que este método pode subestimar a perda de água da cultura em até 5%.

Tabela 6 - Valores médios diários de fluxo de seiva em diferentes unidades para todos os dias de medida para as variedades RB867515 (ano de 2013) e CTC 12 (ano de 2012)

RB867515											
Dia				Dia				Dia			
Fluxo de Seiva				Fluxo de Seiva				Fluxo de Seiva			
Juliano	L colmo ⁻¹	L m ⁻² folha ⁻¹	mm	Juliano	L colmo ⁻¹	L m ⁻² folha ⁻¹	mm	Juliano	L colmo ⁻¹	L m ⁻² folha ⁻¹	mm
134	0,27	0,80	2,39	146	0,31	0,91	2,73	174	0,15	0,45	1,34
135	0,35	1,02	3,05	147	0,07	0,21	0,64	175	0,20	0,58	1,74
136	0,40	1,18	3,55	148	0,14	0,40	1,21	176	0,14	0,41	1,22
137	0,15	0,45	1,34	149	0,06	0,17	0,50	177	0,06	0,16	0,49
138	0,37	1,10	3,29	150	0,27	0,78	2,34	178	0,16	0,47	1,40
139	0,33	0,97	2,92	167	0,32	0,94	2,81	179	0,20	0,58	1,00
140	0,41	1,21	3,62	168	0,27	0,80	2,41	180	0,39	1,15	3,46
141	0,27	0,79	2,38	169	0,38	1,11	3,34	181	0,11	0,33	0,99
142	0,20	0,60	1,81	170	0,41	1,19	3,57	182	0,11	0,33	0,99
143	0,21	0,61	1,84	171	0,25	0,73	2,18	183	0,23	0,68	2,04
144	0,11	0,33	0,98	172	0,28	0,84	2,51	184	0,33	0,96	2,89
145	0,24	0,72	2,16	173	0,22	0,65	1,96	185	0,28	0,83	2,48

CTC 12				
Dia		Fluxo de Seiva		
Juliano		L colmo ⁻¹	L m ⁻² folha ⁻¹	mm
41		0,45	1,32	4,24
42		0,30	0,88	2,82
43		0,28	0,82	2,64
44		0,23	0,68	2,16
45		0,34	1,00	3,20
46		0,37	1,09	3,48
47		0,38	1,12	3,58
48		0,44	1,29	4,14
49		0,50	1,47	4,71
50		0,37	1,09	3,48

Na Figura 28 A, verifica-se esta relação para a AE1, em que, nos dias 48 (FS=4,14 mm dia⁻¹) e 49 (FS=4,71 mm dia⁻¹), ocorreram as maiores taxas transpiratórias e a radiação global (Qg) foi de 29,9 e 28,4 MJ m⁻²dia⁻¹ respectivamente. Para os dias 43 (FS=2,64 mm dia⁻¹) e 44 (FS=2,16 mm dia⁻¹) em que ocorreram as menores taxas de transpiração, a Qg ficou entre 17,7 e 14,9 MJ m⁻²dia⁻¹. Para a AE2 (Figura 28 B), nos dias 136 (FS=3,55 mm dia⁻¹), 140 (FS=3,62 mm dia⁻¹), 170 (FS=3,57 mm dia⁻¹) e 180 (FS=3,46 mm dia⁻¹) (ocorrências de maiores taxas de transpiração), a Qg foi de 13, 16,7, 15 e 15,2 MJ m⁻²dia⁻¹ respectivamente, e nos dias 147 (FS=0,64 mm dia⁻¹), 149 (FS=0,50 mm dia⁻¹) e 177 (FS=0,49 mm dia⁻¹) (menores taxas de transpiração) a Qg foi de 2,5, 2,4 e 3,3, MJ m⁻²dia⁻¹ respectivamente,

indicando a coerência das medidas de FS. Nota-se que, nos dias de maior energia disponível na AE2, a Q_g ficou abaixo dos dias com menores Q_g na AE1, salientando a diferença na época de medições em cada uma das áreas. Tal relação foi descrita em cafezal por Marin et al. (2008) porém com a medida do saldo de radiação, em que os autores demonstram a variação temporal da perda de água com a variabilidade da energia disponível. Sakuratani e Abe (1985) também comentam que a incidência de baixa radiação acarreta em um fechamento parcial dos estômatos da cana-de-açúcar, em que os autores encontraram, para o meio-dia, uma redução na taxa de transpiração da cana devido ao aumento da radiação difusa e, consequente redução na radiação direta na área experimental.

Aceitando que as medidas de fluxo de seiva equivalem à transpiração quando integradas em períodos de 24 horas, pode-se afirmar com base nos dados obtidos neste estudo que a transpiração (T) do canavial foi sempre maior que a evapotranspiração de referência, (ET_o) (Figura 28), com exceção aos dias 45, 46 e 47 na AE1, o que coincide com os dados observados de K_c pelo MRB que demonstrou um K_c mais elevado quando da ocorrência de ET_o mais baixa, como será discutido mais adiante. Tomando-se como exemplo a AE2, a variação temporal das duas variáveis analisadas é semelhante com T mais baixa nos dias em que a ET_o foi menor (dias 147, 149 e 177) e a T foi maior nos dias em que a ET_o apresentou-se mais elevada (dias 140, 170 e 180).

Figura 28 - Variação temporal do fluxo de seiva médio (FS, mm dia⁻¹), evapotranspiração de referência (ETo, mm dia⁻¹) e a radiação global (Qg, MJ m⁻² dia⁻¹) para os dias analisados no canavial para a AE1 (A) e AE2 (B)

Ao analisar a AE2, a relação visual descrita na Figura 28 B pode ser comprovada com a Figura 29 A, onde se verifica que o FS apresenta $R^2=0,71$ com a Qg, o que também foi observado por Marin et al. (2008). Uma mesma relação ($R^2=0,68$) foi encontrada com a temperatura máxima (Figura 29 B). Em relação a umidade relativa mínima (Figura 29 C), obteve-se relação encontrada inversamente proporcional ($R^2=0,73$). Quando se observou o FS com a temperatura média (Figura 29 D), obteve-se $R^2=0,29$, porém ao relacionar a temperatura mínima (Figura 29 E) a relação com o FS foi de $R^2=0,15$.

Figura 29 - Relação do fluxo de seiva (mm) com as variáveis ambientais de radiação solar global (A), temperatura máxima (B), umidade relativa do ar mínima (C), temperatura média (D) e temperatura mínima (E) diárias.

5.5 Trocas gasosas e condutância estomática

Observa-se que as taxas de transpiração foliar (El) do canavial, ao início das medições na AE2, apresentam valores abaixo de $0,1 \text{ g m}^{-2}\text{s}^{-1}$, com o aumento da radiação incidente nas folhas (Q_{leaf}), ocorre a elevação das taxas de transpiração, chegando a $0,2 \text{ g m}^{-2}\text{s}^{-1}$ no dia 28 de fevereiro. Estas condições não ocorrem nos dias 19/03 e 14/05 devido à elevada nebulosidade ocorrida nestes dias, o que pode ser verificado nos dados de Q_{leaf} , em que a planta sofre um menor estímulo para proceder seus processos fisiológicos. No dia 04/06, os valores de El ficam menores devido à menor insolação na área experimental, relacionada à declinação solar nesta época do ano e à consequente redução de Q_{leaf} (Figura 30). Nos dias com maior incidência de radiação (28/02 e 09/04) observa-se que ocorre um aumento rápido da condutância estomática (gs), atingindo seu pico por volta do meio dia e no período

vespertino verifica-se um declínio mais suave e constante. Tal fato é observado nos dias nublados e com menor insolação, porém as taxas de g_s modificam com menos intensidade.

Machado et al. (2009) avaliando a resposta da cultura da cana-de-açúcar ao estresse hídrico, encontraram valores de condutância estomática média de 0,15 a 0,25 $\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ e E variando de 2 a 6 $\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Esta mesma variação foi verificada por Gonçalves et al. (2010), avaliando 4 variedades de cana-de-açúcar, com g_s médio entre 0,05 e 0,2 $\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, e E entre 1 e 5 $\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Roberts et al. (1990) verificaram que em canavial plenamente irrigado, a g_s variou entre 0,2 e 0,6 $\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, sendo que no período vespertino, devido à elevação do DPV, a condutância sempre ficava com valores mais baixos.

Figura 30 - Variação diurna da taxa de transpiração ($E - \text{g m}^{-2}\text{s}^{-1}$), condutância estomática ao vapor d'água ($g_s - \text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) e radiação fotossinteticamente ativa incidente na folha ($Q_{\text{leaf}} - \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) medidas com um IRGA nos dias 28 de fevereiro, 19 de março, 9 de abril, 14 de maio e 4 de junho de 2013 para a AE2

A taxa de fotossíntese (A) apresentou um valor no início do dia variando entre 10 e 30 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (14/5 e 28/2 respectivamente), dependendo das condições ambientais nos horários das medidas (Figura 31). No dia 28/02, houve um pico ao meio dia, diferente do que ocorreu no dia 14/5 quando foi observada a presença de nebulosidade e redução acentuada da taxa fotossintética ao final do dia. Em todos os dias analisados, o déficit de pressão de vapor do ar chegou ao valor máximo às 14h, devido ao aumento de temperatura do ar. No dia 19 de março, com maior nebulosidade durante o dia, o DPV não passou de 0,4 kPa ao meio dia, resultando assim em uma menor demanda atmosférica por vapor de água, e consequentemente reduzindo as taxas de fotossíntese, transpiração e condutância estomática (Figura 30 e 31).

Vale mencionar, por fim, que a temperatura na câmara de medição ficou sempre mais elevada que a temperatura do ar, mesmo com o sistema de refrigeração acionado, chegando a 35°C de pico nos dias 28/2, 9/4, 14/5 e 4/6.

Figura 31 - Variação diurna da taxa de fotossíntese ($A - \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), temperatura no interior da câmara de medições ($T_c - ^{\circ}\text{C}$) e déficit de pressão de vapor (DPV – kPa) medidas com um IRGA nos dias 28 de fevereiro, 19 de março, 9 de abril, 14 de maio e 4 de junho de 2013 para a AE2

Analisando as relações entre as variáveis ambientais e a condutância estomática, observou-se que, quando a g_s apresenta valores mais elevados, ocorre uma maior variabilidade da E (Figura 32 A), indicando que, neste caso, outros fatores ambientais também têm relativa importância na perda de água na cana-de-açúcar, como é o caso do déficit de pressão de vapor (Figura 32 B) e da temperatura da folha (Figura 32 C).

A relação entre as taxas de fotossíntese e transpiração (Figura 32 D) resultou em $R^2=0,72$, demonstrando a interdependência de ambas com a condutância estomática devido à abertura dos estômatos para absorção de CO_2 e perda de vapor d'água. Esta relação entre E e A resulta na produtividade de água (Figura 32 E) que apresenta-se muito dispersa, em valores

menores que $6 \mu\text{molCO}_2 \text{ mmolH}_2\text{O}^{-1}$ (R^2 0,07), valor semelhante ao verificado por Gonçalves et al (2010) que ficou em torno de $5 \mu\text{molCO}_2 \text{ mmolH}_2\text{O}^{-1}$.

Outro fator ambiental importante para o controle da transpiração foliar (E) da cana-de-açúcar é a radiação fotossinteticamente ativa incidente nas folhas (Q_{leaf}), havendo porém uma influência indireta da temperatura do ar sobre a mesma (Figura 32 F), como pode-se observar também nas Figuras 33 e 34.

Figura 32 - Relação entre a taxa de transpiração e a condutância estomática (A), déficit de pressão de vapor entre a folha e a câmara de medições (B), temperatura da folha (C), taxa fotossintética (D), produtividade de água (E) e incidência de radiação fotossinteticamente ativa (F) para a AE2

A Figura 33 apresenta a relação entre a transpiração foliar (E) e a radiação incidente na folha (Q_{leaf}), em cinco diferentes faixas de temperatura na câmara de medidas em que é

possível observar que as menores faixas de temperatura, entre 23 e 27,2°C (faixa 1) mesmo com diferente incidência da radiação, a taxa de transpiração fica praticamente estável, apresentando $R^2=0,24$. Na faixa entre 27,3 e 31,4°C (faixa 2), a relação melhora, porém a resposta da cultura ao aumento da radiação ainda é pequena ($R^2=0,59$).

De modo geral, conforme aumenta a faixa de temperatura, (e.g. faixas 3, 4 e 5), a relação entre a radiação e a transpiração torna-se mais clara, indicando que a cultura da cana-de-açúcar responde ao fator temperatura mesmo tendo disponibilidade de energia radiante, mostrando-se eficiente no uso da radiação quando a temperatura do ar supera os 30°C.

Figura 33 - Relação entre a taxa de transpiração (E) e a radiação fotossinteticamente ativa (Qleaf) para cinco faixas de temperatura do ar na câmara de medida para a AE2 (1 – 23 a 27,2°C; 2 – 27,3 a 31,4°C; 3 – 31,5 a 35,6°C; 4 – 35,7 a 39,8°C; 5 – > 39,9°C)

Quando a mesma relação de E com Qleaf é feita considerando-se faixas de déficit de pressão de vapor (DPV) na câmara (Figura 34), observou-se que, com o DPV nas faixas de 1 a 3, o aumento da transpiração é semelhante, conforme aumenta a Qleaf, porém na faixa 4 (entre 4,47 a 5,42 kPa) o incremento da radiação resulta em relação mais forte com a transpiração, sendo que nesta faixa de DPV, a radiação incidente foi sempre superior a 1200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Quanto maior for o DPV, mais elevada será a transpiração, devido à maior demanda atmosférica. Pode-se, porém, afirmar que a transpiração é uma resultante de diversas variáveis ambientais, principalmente a temperatura do ar, radiação solar e demanda

atmosférica, o que corrobora com Angelocci et al. (2004) que verificaram o mesmo ocorrendo para lima ácida.

Figura 34 - Relação entre a taxa de transpiração (E) e a radiação fotossinteticamente ativa (Qleaf) para cinco faixas de déficit de pressão de vapor na câmara de medições para a AE2 (1 – 1,27 a 2,33 kPa; 2 – 2,34 a 3,40 kPa; 3 – 3,41 a 4,46 kPa; 4 – 4,47 a 5,52 kPa; 5 – > 5,52 kPa)

Verificou-se também que quanto maior a condutância estomática à difusão de vapor d'água (Figura 35 A), maior será a perda de água pela transpiração foliar (E), uma vez que esta última depende da abertura dos estômatos e do gradiente de pressão de vapor d'água entre a folha e o ar. Concomitantemente, a absorção de CO₂ será afetada do mesmo modo (Figura 35 D), sendo que a taxa de fotossíntese (A) também depende diretamente da abertura dos estômatos, além do gradiente de concentração de CO₂ entre a cavidade subestomática e a atmosfera. A gs não apresentou relação direta com a DPV, Tfolha e Qleaf (Figura 35 B, C e F, respectivamente) uma vez que a grande dispersão dos dados observados ($R^2=0,26$; $0,22$; $0,56$, respectivamente) não permite identificar relações claras entre tais variáveis. Como descrito por Angelocci et al. (2004), padrões de gs são normalmente influenciadas por diversas variáveis ambientais, o que torna a relação com qualquer variável individualmente mais difícil de ser identificada. Como apresentado na Figura 32 E, a produtividade de água também não apresentou relação direta com gs ($R^2=0,005$).

Figura 35 - Relação entre a condutância estomática ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e a taxa de transpiração (A), déficit de pressão de vapor (B), temperatura da folha (C), taxa fotossintética (D), eficiência do uso da água (F) e incidência de radiação fotossinteticamente ativa (F) para a AE2

5.6 Fator de desacoplamento

A Figura 36 ilustra a relação entre a razão das resistências aerodinâmica e foliar com o valor de ômega para a AE2. Dessa relação, pode-se conceituar que os valores extremos para o fator de desacoplamento são: $\Omega \rightarrow 1$ quando $r_s/r_a \rightarrow 0$, o que implica que somente o saldo de radiação contribui para o processo de evapotranspiração e que a vegetação é completamente desacoplada das condições atmosféricas e, $\Omega \rightarrow 0$ quando $r_s/r_a \rightarrow \infty$ indicando completo acoplamento da vegetação-atmosfera, sendo que neste caso, além da radiação, a velocidade do vento e o déficit de pressão de vapor atmosférico contribuem para a evapotranspiração da cultura (MARIN e ANGELOCCI, 2011).

Figura 36 - Relação entre a resistência estomática (r_s) e resistência aerodinâmica (r_a) com o fator de desacoplamento (Ω) para a AE2

Em média, observou-se Ω entre 0,19 (14 de maio de 2013) e 0,52 (28 de fevereiro de 2013), indicando que a cultura da cana-de-açúcar permanece acoplada à atmosfera nas condições climáticas de Piracicaba-SP. Estes resultados são diferentes dos observados por Silva et al. (2012a) em cana-de-açúcar irrigada por sulco no nordeste do Brasil, onde o fator de desacoplamento demonstrou valores médios entre 0,74 sob irrigação e 0,6, quando a irrigação foi interrompida. Estes dados sugerem que a radiação é o principal fator nas regiões quentes e secas, como no Nordeste do Brasil, no controle da evapotranspiração, enquanto nas regiões mais amenas e chuvosas, a velocidade de vento e o déficit de pressão de vapor seriam os principais fatores de controle da evapotranspiração na cultura da cana de açúcar.

Conforme Figura 37 (AE2), durante os dias 28 de fevereiro e 4 de junho, verificou-se que a cultura da cana-de-açúcar tendia ao desacoplamento ($\Omega=0,65$) por volta das 9h, aumentando seu nível de acoplamento com a atmosfera ($\Omega=0,1$) até o final do dia. Nos dias 9 de abril e 14 de maio, a cultura estava mais acoplada no início do dia ($\Omega=0,2$), reduzindo esta relação com a atmosfera no meio do dia ($\Omega=0,5$) e, em 9 de abril, aumentando o acoplamento no final do dia ($\Omega=0,1$) devido ao aumento na velocidade do vento. Em 14 de maio, por exemplo, a cultura permaneceu acoplada durante todo do dia ($0,1 < \Omega < 0,45$), independente do horário, fenômeno causado pelo intenso vento ocorrido durante todo período diurno. Portanto, observou-se que, na cultura da cana-de-açúcar, o fator de desacoplamento tem uma variação semelhante durante o período diurno, com um maior acoplamento com a atmosfera

ocorrendo no período vespertino, o que está diretamente relacionado com a elevação da velocidade do vento.

Figura 37 - Variação diurna do fator de desacoplamento (Ω) para os dias 28 de fevereiro, 19 de março, 9 de abril, 14 de maio e 4 de junho de 2013 para a AE2

O acoplamento vegetação-atmosfera ocorre principalmente em condições de maiores velocidades do vento (u). No dia 28 de fevereiro (Figura 38) valores maiores de Ω (em torno de 0,65) ocorreram ao meio dia, horário onde foi constatada a menor u e, ao contrário, mesmo com os estômatos quase fechados ao final do dia ($g_s=0,5 \text{ m s}^{-1}$), a cultura permaneceu acoplada devido à elevada u atingindo o dossel da cultura ($u_2=2 \text{ m s}^{-1}$). No dia 4 de junho, ao final do dia houve um desacoplamento parcial da cultura ($\Omega=0,65$) devido à redução na velocidade do vento, que será discutido à diante. O mesmo pôde ser observado nos demais dias de medidas onde, sempre que a velocidade do vento foi mais baixa (19/3 às 12h; 9/4 às 14h; 10/5 às 13:30; 4/6 às 17h) a cultura tendeu a desacoplar-se da atmosfera, tendo sua perda de água relacionada basicamente à radiação incidente. Tal fato foi verificado ao relacionar-se Ω e u (Figura 39 A) onde observa-se que quanto maior u , mais acoplada a cultura fica, resultando em um menor Ω ($R^2=0,62$). O aumento de g_s também interfere na relação entre a cultura e o componente aerodinâmico, sendo que quanto maior g_s , mais desacoplada torna-se a cultura (Figura 39 B). Isto se deve ao fato que, com o aumento da condutância estomática, a cultura fica menos resistente à perda de água e passa a responder mais diretamente às variações na atmosfera, uma vez que a principal via de perda de água está mais aberta. O déficit de pressão de vapor tem aparentemente pequena interferência com acoplamento da cultura quando avaliado isoladamente, como apresentado na Figura 39 C ($R^2=0,05$).

Figura 38 - Variação diurna do fator de desacoplamento (Ω), velocidade do vento ($m s^{-1}$), déficit de pressão de vapor (DPV – kPa) e da condutância estomática ($gs - m s^{-1}$) para os dias 28 de fevereiro, 19 de março, 9 de abril, 14 de maio e 4 de junho de 2013 para a AE2

Figura 39 - Relação entre o fator de desacoplamento (Ω) e as variáveis ambientais de velocidade do vento (A), condutância estomática (B) e déficit de pressão de vapor (C) para a AE2

Conforme Figura 40, quanto mais baixo foi o fator de desacoplamento (cultura mais acoplada com a atmosfera) menores foram as taxas de transpiração, sendo que nos períodos de Ω mais elevados observou-se maior incidência de radiação (Figura 30) e os menores Ω ocorreram em períodos com maior velocidade do vento, demonstrando a importância desta variável ambiental no controle de perda de água na cana-de-açúcar. A influência da radiação solar é ilustrada pelas Figura 30 e 38 (referentes ao dia 19 de março), acarretando em maior acoplamento da cultura com a atmosfera durante todo o dia avaliado.

Figura 40 - Relação entre o fator de desacoplamento (Ω) e a transpiração da cana-de-açúcar (E) medida com IRGA na AE2

5.7 Relações entre evapotranspiração, transpiração, coeficiente de cultivo e acoplamento vegetação-atmosfera

Na AE1, no período experimental, observou-se que a evapotranspiração da cultura (ETc) foi maior que a evapotranspiração de referência (ETo) nos dias de ETo mais baixas e menor nos dias de ETo mais elevadas, resultando em uma ETc média de $3,92 \text{ mm dia}^{-1}$ e ETo média de $4,18 \text{ mm dia}^{-1}$ (Figura 41 A) para a época de maior taxa de crescimento vegetativo da cultura. Durante o período de coleta de dados na AE2, observou-se que a ETc sempre foi superior a ETo. No período, a ETc média foi de $3,25 \text{ mm dia}^{-1}$ enquanto que a ETo foi de $2,12 \text{ mm dia}^{-1}$ (Figura 41 B), coincidindo com a época de máximo crescimento da cultura da cana-de-açúcar. Com a mesma metodologia para a estimativa da ETc, Silva et al. (2012b) encontrou para a variedade RB92579 uma ETc média de $4,7 \text{ mm dia}^{-1}$ em ambiente semiárido.

Figura 41 - Variação da evapotranspiração de referência (ETo-mm dia⁻¹) e evapotranspiração de cultura (ETc-mm dia⁻¹) dos canaviais estudado na AE1 (A) e AE2 (B) e respectivas médias móveis para 10 dias

O coeficiente de cultura (Kc) médio para o período avaliado nos dois canaviais, em fase de pleno crescimento vegetativo, foi de $1,37 \pm 0,52$ (Figura 42), com média de 10 dias variando entre 0,6 e 1,2 para a AE1 (Figura 43 A) e 1,1 e 2,4 na AE2 (Figura 43 B). Este alto valor foi parcialmente devido ao fato de que nos períodos em que a ETo é mais baixa, o Kc foi mais elevado e, conforme crescia a ETo o valor de Kc mostrava-se relativamente menor (Figura 44, Tabela 7). Esta resposta da cultura deve-se ao fato de que, quando observou-se ETo mais elevada, consequentemente a demanda atmosférica foi mais alta e, conforme Marin et al. (2005), as diferenças nas condições micrometeorológicas, especialmente a demanda

atmosférica, são importantes na determinação do K_c de uma cultura. Estes mesmos autores observaram um K_c variável, conforme as condições de DPV para um cafezal. Marin e Angelocci (2011) verificaram a mesma resposta para lima ácida afirmando que em diversos trabalhos de condutância foliar em citros, foi verificada uma restrição da perda de água sob alta demanda atmosférica. Grantz e Meinzer (1991) avaliaram a resposta do dossel de um canavial, verificando que em condições de aumento da demanda atmosférica, a condutância da cultura ao vapor de água foi reduzida.

O K_c observado foi 9,6% maior que o indicado para a cultura da cana-de-açúcar por ALLEN et al., (1998), que recomenda o valor de 1,25, o que foi determinado para o uso em canaviais irrigados na Austrália e Swazilândia no período de máximo crescimento, em estudo realizado por Inman-Bamber e McGlinchey (2003) e posteriormente por Olivier e Singels (2012) para a África do Sul. Os valores de K_c aqui encontrados também foram maiores que os observados por Silva et al. (2012b) com valor de 1,1 para o período de máximo crescimento da cultura da cana no semiárido brasileiro sendo que esta diferença pode ser explicada pela diferença da ETo ocorrida no semiárido (mais alta) e a observada na área experimental (mais baixa) corroborando com a Figura 44.

Figura 42 - Relação entre a evapotranspiração de referência (ETo) e evapotranspiração de cultura estimada pelo MRB (ETc) referentes a ambos canaviais

Figura 43 - Variação temporal do coeficiente de cultura – Kc (pontos) e Kc médio a cada 10 dias (linhas contínuas) para AE1 (A) e AE2 (B)

Figura 44 - Relação entre o coeficiente de cultura (Kc) de ambos canaviais estudados e a evapotranspiração de referência (ETo-mm) pelo método do boletim da FAO 56

Tabela 7 - Relação entre faixas de evapotranspiração de referência (ETo-mm), evapotranspiração de cultura (ETc-mm) e coeficiente de cultura (Kc) de ambas áreas experimentais

ETo	ETc	kc
0 a 2	2,1 ± 0,91	1,9 ± 0,51
2,1 a 4	3,8 ± 0,96	1,4 ± 0,33
4,1 a 6	4,9 ± 1,00	1,0 ± 0,24
> 6	4,5 ± 0,65	0,7 ± 0,10

A Figura 45 ilustra a relação inversa entre DPV e Kc, com Kc na faixa de 2 para valores de DPV próximos de zero e Kc na faixa de 0,9 quando o DPV aproxima-se de 4. Ao correlacionar a ETc com DPV, observou-se que em condições de DPV baixas, a ETc também foi menor e, conforme o DPV aumenta, mesmo resultando em um Kc menor, a ETc é mais alta (Figura 46). Pode-se também inferir que a taxa de aumento da ETc é inversamente proporcional ao aumento da DPV, isto é, quanto maior a DPV, menor o incremento da ETc. Este fato foi observado por outros estudos com diferentes culturas (MARIN et al., 2005; MARIN e ANGELOCCI, 2011) devido ao controle que as plantas tem para evitar a perda de água em condições de alta demanda. Keating et al. (1999) também apontou que a taxa fotossintética e transpiratória é reduzida quando a demanda atmosférica por água é maior que a capacidade de suprimento de água pelas raízes. Por outro lado, Silva et al. (2012b) não observou estas condições no estudo da cana-de-açúcar na região Nordeste Brasileira.

Figura 45 - Relação entre o coeficiente de cultura (Kc) e o déficit de pressão de vapor (DPV) para ambas áreas experimentais

Figura 46 - Relação entre a evapotranspiração da cultura (ETc) e o déficit de pressão de vapor (DPV) para ambas áreas experimentais

Observou-se também a relação entre T e ETo ($R^2=0,67$) quando, nos dias avaliados, a T foi 36% maior que a ETo (Figura 47), com média de $2,46 \pm 1$ e $1,8 \pm 1,19$, respectivamente. Saliente-se que as campanhas de medida do fluxo de seiva deram-se na sua maioria em períodos de baixa ETo (menor que 2 mm dia^{-1}). Observa-se na mesma figura uma tendência de redução na proporção T/ETo quando a ETo fica mais elevada, a partir de 2 mm dia^{-1} , o que corrobora com as informações discutidas com relação à ETc/ETo dos canaviais estudados o que corrobora com os resultados encontrados para lima ácida por Marin e Angelocci (2011),

em que os autores afirmam que a transpiração não segue o padrão da ETo e, no caso da cultura avaliada pelos mesmos, a T estabilizou-se quando a ETo chegou a 4 mm dia⁻¹.

Figura 47 - Relação entre a transpiração pelo fluxo de seiva (T) e a evapotranspiração de referência (ETo) para ambas áreas experimentais

Com base nos dados de evapotranspiração e transpiração, pode-se dizer que o canavial estudado na AE2 é composto por 90% de água perdida pela transpiração das plantas e 10% pela evaporação da água pelo solo (Figura 48).

Figura 48 - Relação entre a transpiração medida pelo fluxo de seiva (FS) e a evapotranspiração da cultura (ETc) para a AE2

No período mais chuvoso de medidas em campo na AE2, entre fevereiro e março, a ETo média foi de 3,1 mm dia⁻¹ enquanto que a ETc média foi de 4,1 mm dia⁻¹, resultando em um Kc de 1,3 (Tabela 8). Neste mesmo período a cultura ficou acoplada à atmosfera (Ω 0,41) e a transpiração média medida na folha foi de 1 mm h⁻¹ entre as 9 e 17 horas do dia. Verifica-se que se este valor for integrado para o período diurno resultaria em valor fisicamente inconsistente de transpiração de cerca de 10 mm d⁻¹.

Interessante lembrar a discussão apresentada por Jarvis e McNaughton (1986) sobre essa questão afirmando que os efeitos da mudança da gs na transpiração de uma folha somente pode ser extrapolado para uma outra escala se as condições ambientais ao redor desta folha e da escala alvo forem similares, tanto para o Ω quanto para o DPV. Além disso, considerando a já conhecida variabilidade espaço temporal de gs (JARVIS e MCNAUGHTON, 1986; MEIZER E GRANTZ, 1989; GRANTZ, 1989; MCNAUGHTON e JARVIS, 1991; MEINZER, 1993; TARDIEU e SIMONNEAU, 1998; INMAN-BAMBER e SMITH, 2005; SMITH et al., 2005), deve-se tomar com cautela o processo de extrapolação da folha para a planta e especiação para uma cultura. Jarvis e McNaughton (1986) também inferiram que, como resultado do controle individual dos estômatos, as folhas de uma mesma planta podem ter diferentes taxas de transpiração e diferentes plantas podem ter uma perda de água com diferentes taxas num mesmo lugar e com as mesmas condições ambientais.

A Tabela 8 também apresenta dados coletados em um período mais frio e seco, para a AE2, entre Maio e Junho, em que os valores médios de ETo e ETc foram de 1,4 e 2,5 mm dia⁻¹, respectivamente, resultando em um Kc mais elevado quando comparado com o período mais quente e úmido (1,7). Neste período mais frio, o fator de desacoplamento teve valor médio de $\Omega=0,35$ e a transpiração medida pelo fluxo de seiva indicou média diária de 1,9 mm (correspondente a 76% da perda de água pelo canavial) e, ao nível foliar, esta perda ficou em 0,67 mm h⁻¹ entre as 9 e 17h, em média, o que, se extrapolado para um dia inteiro com 8 horas, resulta em 5,36 mm de transpiração foliar, o que representa uma superestimativa da transpiração da cultura, possivelmente ocorrido devido à localização das medições, com radiação direta incidente na folha amostrada.

Tabela 8 - Médias de evapotranspiração de referência (ET_o), evapotranspiração do canavial (ET_c), coeficiente da cultura (K_c), transpiração pelo método do balanço de calor (T_{FS}), transpiração na folha (T_{FOLHA}) e fator de desacoplamento (Ω) para os períodos de fevereiro/março (chuvoso) e maio/junho (seco) para AE2

Período	ET _o mm dia ⁻¹	ET _c mm dia ⁻¹	k _c	T _{FS} mm dia ⁻¹	T _{FOLHA} mm h ⁻¹	Ω
Fevereiro/Março	3,1	4,1	1,3	-	1	0,41
Maio/Junho	1,4	2,5	1,7	1,9	0,67	0,35

A Figura 42 mostra que o K_c é variável conforme a ET_o (Figura 44). Sob condição de alta radiação incidente, o que resulta em uma maior g_s (Figura 35 F), e baixa velocidade do vento (Figura 39 A), foi possível verificar uma tendência de desacoplamento (Ω elevado) (Figura 37). Tal fato pode explicar a variação do K_c da cana-de-açúcar (Tabela 7) em que com Ω mais baixos (cultura acoplada) os componentes aerodinâmico e radiativo agem conjuntamente na demanda por água e, por este motivo, a cultura não seria capaz de atender esta demanda, apresentando um controle da troca de vapor d'água com a atmosfera. Quando a cultura tende a desacoplar-se da atmosfera, ao contrário, a radiação incidente é o principal responsável pela perda de água (STEDUTO e HSIAO, 1998).

Esta variação da perda de água pela cultura não foi verificada por Silva (2009), em canavial irrigado na região NE do Brasil, em que o K_c da cultura permaneceu estável, em torno de 1,1. Por outro lado, em estudos realizados com outras culturas por Marin et al. (2005) e Marin e Angelocci (2011) foi observado o mesmo comportamento aqui encontrado. Para a cultura do café, por exemplo, os autores identificaram uma variação no coeficiente de cultura basal (K_{cb}) com a ET_o, sendo esta variação causada principalmente pelo forte acoplamento da cultura com a atmosfera e a limitação da espécie em atender a essa demanda. No segundo caso, os autores trabalharam com lima ácida, afirmando que o acoplamento da cultura é a principal causa para a redução do K_{cb} quando se observa um aumento da ET_o, sendo esta redução em torno de 40% com a elevação da ET_o de 3 para 5 mm dia⁻¹, recomendando o uso de um K_c variável em função da ET_o.

5.8 Avaliação dos algoritmos de transpiração e evapotranspiração do modelo DSSAT/CANEGRO

A calibração do modelo DSSAT/CANEGRO (DC) foi realizada para um conjunto de dados observados da variedade RB867515 cultivadas em diferentes áreas experimentais e climas (MARIN et al., 2013b), o que confere uma maior robustez aos parâmetros calibrados.

O modelo DC simulou valores inferiores aos observados de IAF (Figura 49 A) em todo o ciclo ($R^2=0,85$) (Tabela 9), no início do ciclo a simulação subestimou até o 163 DAP, com IAF de 3,15, chegando ao pico de 4,15 $m^2 m^{-2}$ aos 250 DAP. Para a massa fresca do colmo (Figura 49 B) o modelo DC apresentou um desempenho com concordância de $R^2=0,94$ (Tabela 9), exibindo subestimativa de massa fresca ao final do ciclo. Interessante destacar que o mesmo padrão não foi observado para massa seca (Figura 49C) com leve superestimativa ao longo do ciclo e com melhor aderência em relação às observações de campo ($R^2=0,93$) (Tabela 9).

Na simulação do número de folhas verdes (Figura 49 D) houve coerência entre os dados observados ($R^2=0,77$), com oscilação entre 7 a 9 folhas verdes, o que ocorre devido ao lançamento de folhas novas pela planta e consequentemente morte das folhas mais velhas. Para esta variável, salienta-se que a eficiência de modelagem (E_f) (WALLACH et al., 2006) ($E_f=-0,34$) ocorreu devido à pouca variabilidade no nº FV, o que desfavorece a avaliação do modelo pela E_f (Tabela 9).

Quando avaliou-se o perfilhamento da cultura (Figura 49 E) no modelo DC, o pico máximo foi de 15 perfilhos m^{-2} com estabilização em 10 perfilhos m^{-2} , resultando em $R^2=0,95$ e $E_f=0,91$ (Tabela 9), sendo esta a variável mais coerente com os dados observados em campo. Na simulação do acúmulo de sacarose (Figura 49 F) observou-se um incremento do POL mais rápido e precoce com relação aos dados observados ($R^2=0,94$; $E_f=-2,43$) (Tabela 9) o que pode ser explicado devido ao método e aos dados de calibração utilizada na simulação com o DC (constituídos principalmente de experimentos de sequeiro), conforme mencionado anteriormente. No caso de uma calibração realizada somente para a área experimental avaliada, o POL certamente poderia ser melhor simulado, porém com perda de aderência para outras áreas canavieiras. Esse aspecto também denota a importância de ajuste do algoritmo de simulação do conteúdo de sacarose e umidade do colmo do modelo DC para as condições brasileiras.

Figura 49 - Variação do índice de área foliar de folhas verdes (IAF–m² m⁻²), massa fresca e massa seca do colmo (t ha⁻¹), folhas verdes (nº), perfilhamento (nº m⁻²) e teor de sacarose (POL, %) para a AE2, simulada (linha contínua) e observada (pontos) para a variedade RB867515

Tabela 9 - Média e desvio padrão dos dados observados e simulados, correlação (R²), índice “D” de Willmott (1981), raiz quadrada do erro médio (RMSE) e eficiência de modelagem (Ef) para a variedade RB867515

Variável	Observado		Simulado		R ²	D	RMSE	Ef
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão				
IAF	2,62	1,55	1,82	1,29	0,85	0,88	1,01	0,58
Massa Fresca (t ha⁻¹)	112,96	37,33	97,98	24,41	0,94	0,89	21,11	0,68
Massa Seca (t ha⁻¹)	17,85	9,51	24,66	7,54	0,93	0,84	7,43	0,39
Perfilhamento (nº)	11,26	4,08	11,54	3,18	0,95	0,97	1,23	0,91
Folhas Verdes (nº)	6,61	1,49	6,72	2,88	0,77	0,83	1,73	-0,34
POL (%)	7,46	2,27	11,58	1,54	0,94	0,55	4,21	-2,43

O modelo DC permite utilizar, para a estimativa da evapotranspiração, os métodos de Priestley-Taylor (1976) e do boletim da FAO 56 (Allen et al, 1998). Foi realizada uma análise

de sensibilidade do mesmo com relação às variáveis ambientais de velocidade do vento, radiação global, umidade relativa do ar, temperatura mínima e temperatura máxima. O modelo simulou incremento de 7% na evapotranspiração (ET) com a redução da umidade relativa em 10%, e nenhuma variação quando há a elevação da umidade do ar (Figura 50 A). Para as outras variáveis ambientais o modelo indicou queda de até 5% na ET para redução da radiação e temperaturas máxima e mínima. Para a velocidade do vento, o modelo apresentou sensibilidade menor do que 1% tanto no incremento quanto no decréscimo da variável ambiental. A mesma variável de umidade relativa resultou em elevada sensibilidade quando observada a transpiração (T) da cultura (Figura 50 B), com incremento de 25% na T com redução da UR e, para as demais variáveis ambientais, com exceção do vento, foi observada uma sensibilidade linear de até 15% (radiação global), aumentando com o incremento de 10% na variável ambiental e diminuindo com a redução da mesma porcentagem.

Figura 50 - Resposta relativa da análise de sensibilidade para as variáveis de velocidade do vento, radiação global, umidade relativa, temperatura máxima e temperatura mínima para a evapotranspiração (A) e transpiração (B) simulados para a variedade RB867515 com dados da AE2

Quando a ET foi simulada pelo modelo utilizando-se o método FAO 56, a evapotranspiração aproximou-se da ETc obtida com o MRB com diferença inferior a 1% (Figura 51 A). Para os casos em que não se tem todas as variáveis de entrada disponíveis para este método (temperaturas máxima e mínima, radiação global, precipitação pluvial, umidade relativa mínima e velocidade do vento) o sistema DSSAT disponibiliza uma adaptação do método de Priestley-Taylor, o qual necessita somente dos dados de temperaturas máxima e mínima e radiação global. Para este método, a simulação perde em qualidade em comparação com o FAO 56, superestimando em cerca de 14% os valores de ETc observados (Figura 51 B), sem contudo afetar de modo pronunciado as simulações de produtividade e POL (Figura 53).

Figura 51 - Relação entre evapotranspiração da cultura observada pelo MRB na AE2 (ETc observada) e a evapotranspiração da cultura simulada pelo modelo DSSAT/CANEGRO utilizando o método FAO 56 (A) e o método de Priestley-Taylor (B)

Para a transpiração da cultura, observou-se boa coerência entre os dados observados e simulados nos dias com medições do fluxo de seiva (Fig. 52 A). Interessante mencionar que os dados observados tiveram picos de máxima e mínima sempre maiores e menores que os simulados, respectivamente (Figura 52 A). Ao se relacionar as duas variáveis, verificou-se $R^2=0,79$, com os dados observados maiores que os simulados em 6,5% (Figura 52 B).

Figura 52 - Variação temporal da transpiração do canavial simulada e observada (A) e a relação entre os dados simulados e observados (B)

Comparando as duas metodologias de estimativa de evapotranspiração do modelo, verificou-se que na utilização da estimativa pelo boletim da FAO 56, a produtividade foi maior que com o método de Priestley-Taylor (PT) em cerca 10% (Figura 53 A), sendo esta diferente decorrente das variáveis meteorológicas de entrada no modelo, já que a FAO 56 utiliza a umidade relativa mínima para o cálculo do DPV. Para a concentração de sacarose,

ambos os métodos de estimativa apresentaram resultados similares no final do ciclo, porém com cerca de 150 dias após plantio (DAP) o PT apresentou uma maior concentração de sacarose (Figura 53 B).

Figura 53 - Comparação temporal dos métodos FAO 56 e Priestley-Taylor para simulação de produtividade (A) e teor de sacarose (B)

Durante o ciclo de cultivo da cana-de-açúcar na AE2, a ET_c média observada pelo MRB foi de $3,12 \text{ mm dia}^{-1}$ e a ET_o foi de $2,11 \text{ mm dia}^{-1}$ resultando em um K_c de 1,47, ficando mais baixo que o K_c médio simulado pelo modelo DSSAT/CANEGRO (1,57) com ET simulada de $3,33 \text{ mm dia}^{-1}$ (Tabela 10). Salienta-se que os valores de K_c simulados representam todo o ciclo da cultura, desde o início da emergência até a colheita, e o K_c observado apresenta um resultado médio do período de medidas realizadas pelo MRB.

Tabela 10 - Dados médios do ciclo do canavial na AE2 para as variáveis de evapotranspiração da cultura observado (ET_c), evapotranspiração simulada pelo modelo DSSAT/CANEGRO (ET_{DSSAT}), evapotranspiração de referência (ET_o), coeficiente de cultura observado (K_c) e coeficiente de cultura observado (K_c) e coeficiente de cultura simulado (K_{cDSSAT})

ET_c mm	ET_{DSSAT} mm	ET_o mm	K_c	K_{cDSSAT}
3,12	3,33	2,11	1,47	1,57

5.9 Produtividade de água

Durante o ciclo da cultura na AE2, verificou-se variação da produtividade de água (PA) da cultura entre 9,9 e 52,2 kg m⁻³ de água evapotranspirada na cultura. Computando o ciclo completo da cultura, obtém-se produtividade de água de 16,2 kg m⁻³ e, considerando-se somente a massa seca, observou-se um incremento entre 1,1 e 12,3 kg m⁻³ com média de 3,2 kg m⁻³ de massa seca (Tabela 11).

A título de comparação, tem-se no trabalho de Maschio (2011) a avaliação da PA para 24 variedades de cana-de-açúcar cultivadas em casa de vegetação com irrigação controlada, obtendo-se produtividade de água na ordem de 16 a 29 kg m⁻³, valor este próximo do observado na AE2. Especificamente para a variedade RB867515 o autor observou 26,1 kg m⁻³, valor este superior ao verificado em campo, provavelmente por causa das condições ambientais dentro da casa de vegetação, a diferença de tamanho entre as parcelas experimentais e às diferenças quanto as fases fenológicas amostradas.

Kingston (1994) em uma revisão de artigos, avaliou que a eficiência do uso da água pela cana-de-açúcar variou entre 8,37 e 20,94 kg m⁻³ enquanto que Robertson e Muchow (1994) reportaram valores entre 4,8 e 12,1 kg m⁻³ em experimentos na Austrália, Hawaii e Sudeste da África. Estes mesmos autores inferiram que a variabilidade da eficiência da cultura no uso da água ocorre devido à algumas razões como variações no déficit de pressão de vapor e conteúdo de massa seca no colmo. A presença maior de massa seca no colmo influenciando a eficiência no uso da água também foi verificada por Inman-Bamber et al (1999a) que, em áreas plenamente irrigadas encontraram valores de até 27 kg m⁻³.

Tabela 11 - ETC acumulada (mm), variação de massa fresca e seca e produtividade de água (PA) em períodos específicos e ao longo de todo o ciclo

Período	Nº dias	ETC (mm) acumulada	Δ Massa (ton ha ⁻¹)		PA (kg m ⁻³)	
			Fresca	Seca	Fresca	Seca
16/10/2012 a 16/02/2013	123	557,6	55,2	6	9,9	1,1
17/02/2013 a 22/03/2013	34	150,3	31,5	6	21,0	4,0
23/03/2013 a 15/05/2013	54	188,3	35,1	10,8	18,6	5,7
16/05/2013 a 15/06/2013	31	63,4	33,1	7,8	52,2	12,3
Ciclo todo	242	959,6	154,9	30,6	16,1	3,2

6 CONCLUSÕES

O dados oriundos do Método da Razão de Bowen indicaram que o canavial estudado teve fluxo de calor sensível (H) representando em média 25% do saldo de radiação disponível na área, enquanto o fluxo de calor latente (LE) representou 70% e o fluxo de calor no solo (G) 5%.

A transpiração medida pelo fluxo de seiva pelo método do balanço de calor indicou que a transpiração do canavial representou 90% da perda por evapotranspiração.

O canavial estudado apresentou-se predominantemente acoplado à atmosfera, com Ω média de 0,37.

O Kc do canavial estudado apresentou variabilidade temporal devido às condições de acoplamento da cultura e conforme a evapotranspiração de referência (ET_o).

O modelo DSSAT/CANEGRO mostrou-se capaz de simular o crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar, incluindo os processos de evapotranspiração, transpiração e evaporação. O desempenho foi melhor quando se utilizou informações de umidade relativa do ar mínima ou a temperatura do ponto de orvalho, juntamente com a evapotranspiração de referência de acordo com Allen et al. (1998).

REFERÊNCIAS

- ALFONSI, R.R.; PEDRO JR., M.J.; BRUNINI, O.; BARBIERI, U. Condições climáticas para a cana-de-açúcar. In: PARANHOS, S.B. (Coord.). **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. p. 42-55.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Irrigation and drainage**. Rome: FAO, 1998. 22p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; HOWELL, T.A.; JENSEN, M.E. Evapotranspiration information reporting: II. Recommended documentation. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 98, p. 921-929, 2011.
- ALLISON, J.C.S.; PAMMENTER, N.W.; HASLAM, R.J. Why does sugarcane (*Saccharum* sp. Hybrid) grow slowly? **South African Journal of Botany**, Pretória, v. 73, p. 546-551, 2007.
- ANGELOCCI, L.R. **Água na planta e trocas gasosas/energéticas com a atmosfera: Introdução ao tratamento biofísico**. Piracicaba: Esalq/USP, 2002. 272p.
- ANGELOCCI, L.R.; MARIN, F.R.; OLIVEIRA, R.F.; RIGHI, E.Z. Transpiration, leaf conductance, and atmospheric water demand relationship in an irrigated acid lime orchard. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Campo dos Goytacazes, n. 16, v. 1, p. 53-64, 2004.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES. **Anuário da indústria automobilística brasileira**. 2013. Disponível em: <<http://www.anfavea.com.br/anuario.html>>. Acesso em: 17 set. 2014.
- BAKER, J.M.; VAN BAVEL, C.H.M. Measurements of mass flow of water in stems of herbaceous plants. **Plant, Cell and Environment**, Amsterdam, v. 10, p. 777-782, 1987.
- BARBIERI, V.; BACCHI, O.O.S.; VILLA NOVA, N.A. Análise do fator temperatura média do ar no desenvolvimento vegetativo da cana-de-açúcar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 1., 1979, Mossoró. **Anais...** Mossoró: SBA, 1979. v. 1, p. 6-8.
- BARBIERI, V. **Condicionamento climático da produtividade potencial da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*): um modelo matemático-fisiológico de estimativa**. 1993. 140p. Tese (Doutorado em Agrometeorologia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1993.
- BERDING, N.; HURNEY, A.P.; SALTER, B.; BONNETT, G.D. Agronomic impact of sucker development in sugarcane under different environmental conditions. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, n. 1, p. 203-217, 2005.
- BEZUIDENHOUT, C.N.; O'LEARY, G.J.; SINGELS, A.; BAJIC, V.B. A process-based model to simulate changes in tiller density and light interception of sugarcane crops. **Agricultural Systems**, Amsterdam, v. 76, p. 589-599, 2003.

BOEHRINGER, D.; ZOLNIER, S.; RIBEIRO, A.; STEIDLE NETO, A.J. Determinação do fluxo de seiva na cana-de-açúcar pelo método do balanço de energia caulinar. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 33, n. 2, p. 237-248, 2013.

BOOTE, K.J.; JONES, J.W.; PICKERING, N.B. Potential uses and limitations of crop models. **Agronomy Journal**, Madison, v. 88, p. 704-716, 1996.

BOWEN, I.S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. **Physical Review**, New York, v. 27, p. 779-787, 1926.

BRAY, S.C. **A cultura da cana-de-açúcar no Vale do Paranapanema**. 1980. 170p. Tese (Doutorado em História) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1980.

BULL, T.A.; GLASZIOU, K.T. Sugarcane. In: EVANS, L.T. (Ed.). **Crop physiology some case histories**. Cambridge: Cambridge University Press, 1975. p. 51-72.

CANABRAVA, A.P. **História econômica**: estudos e pesquisas. Unesp, 2005. 785p.

CARDOZO, N.P.; SENTELHAS, P.C. Climatic effects on sugarcane ripening under the influence of cultivars and crop age. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 70, n. 6, p. 449-456, 2013.

CHABOT, R.; BOUARFA, S.; ZIMMER, D.; CHAUMONT, C.; MOREAU, S. Evaluation of the sap flow determined with a heat balance method to measure. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 75, n. 1, p. 10-24, 2005.

CHEAVEGATTI-GIOANNOTTO, A.; ABREU, H.M.C.; ARRUDA, P.; BESPALHOK FIL J.C.; BURNQUIST, W.L.; CRESTE, S.; DI CIERO, L.; FERRO, J.A.; FIGUEIRA, A.V.O.; FILGUEIRAS, T.S.; GROSSI-DE-SÁ, M.F.; GUZZO, E.C.; HOFFMAN, H.P.; LANDELL, M.G.A.; MACEDO, N.; MATSUOKA, S.; REINACH, F.C.; ROMANO, E.; SILVA, W.J.; SILVA FILHO, M.C.; ULIAN, E.C. Sugarcane (*Saccharum X officinarum*): A reference study for the regulation of genetically modified cultivars in Brazil. **Tropical Plant Biology**, London, n. 4, p. 62-89, 2011.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Cana-de-açúcar**: safra 2014/2015 segundo levantamento. Brasília, 2014. 23 p. (Relatório de Acompanhamento da Safra Brasileira).

CONSELHO DOS PRODUTORES DE CANA-DE-AÇÚCAR, AÇÚCAR E ÁLCOOL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Manual de instruções**. 5. ed. Piracicaba, 2006. 111p.

CORTEZ, L.A.B. Introdução. In CORTEZ, L.A.B. (Coord.) **Bioetanol de cana-de-açúcar**: PeD para produtividade e sustentabilidade. São Paulo: Blucher, 2010. 954p.

COSTA, L.G.; MARIN, F.R.; NASSIF, D.S.P.; PINTO, H.M.; LOPES-ASSAD, M.L. Simulação do efeito combinado de palhada e adubação na modelagem da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 5, p. 469-474, 2014.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. . Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 2006. 306p.

FARIAS, C.H.A.; FERNANDES, P.D.; AZEVEDO, H.M.; NETO, J.D. Índices de crescimento da cana-de-açúcar irrigada e de sequeiro no Estado da Paraíba, **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 4, p. 356-362, 2008.

GAVA, G.J.C.; TRIVELIN, P.C.O.; OLIVEIRA, M.W.; PENATTI, C.P. Crescimento e acúmulo de nitrogênio em cana-de-açúcar cultivada em solo coberto com palhada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 11, p. 1347-1354, 2001.

GOLDEMBERG, J. Ethanol for a sustainable energy future. **Science**, Washington, v. 315, p. 808-810, 2007

GONÇALVES, E.R.; FERREIRA, V.M.; SILVA, J.V.; ENDRES, L. BARBOSA, T.P.; DUARTE, W.G. Trocas gasosas e fluorescência da clorofila a em variedades de cana-de-açúcar submetidas à deficiência hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 4, p. 378-386, 2010.

GRANIER, A. Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. **Annales des Sciences Forestières**, Paris, v. 42, n. 2, p. 81-88, 1985.

GRANTZ, D.A.; MEINZER, F.C. Regulation of transpiration in field-grown sugarcane: evaluation of the stomatal response to humidity with the Bowen ratio technique. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 53, p. 169-183, 1991.

GUTIÉRREZ, M.V.; HARRINGTON, R.A.; MEINZER, F.C.; FOWNES, J.C. The effect of environmentally induced stem temperature gradients on transpiration estimates from the heat balance method in two tropical woody species. **Tree Physiology**, Oxford, v. 14, p. 179-190, 1994.

HEILMAN, J.L.; BRITTIN, C.L. Fetch requirements for Bowen ratio measurements of latent and sensible heat fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 44, p. 261-273, 1989.

INMAN-BAMBER, N.G. A growth model for sugarcane based on a simple carbon balance and the CERES-Maize water balance. **South African Journal of Plant Soil**, Mount Edgecombe, v. 8 n. 2, p. 93-99, Feb. 1991.

_____. DSSAT/CANEGRO: its history, conceptual basis, present and future uses. In: ROBERTSON, M.J. (Ed.). **Research and modelling approaches to assess sugarcane productions opportunities and constrains**. Brisbane: University of Queensland, 1994. p. 31-34.

INMAN-BAMBER, N.G.; KIKER, G. **DSSAT/CANEGRO 3.10**: DSSAT version 3.1 1998 Distribution Software DSSAT/CANEGRO 3.10. DSSAT version 3.1. Honolulu: University of Hawaii, Honolulu, 1998.

INMAN-BAMBER, N.G.; ROBERTSON, M.J.; MUCHOW, R.C.; WOOD, A.W.; PACE, R.; SPILLMAN, M.F. Boosting yields with limited irrigation water. In: PROCEEDINGS OF THE AUSTRALIAN SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGY, Townsville, 1999. p. 203-211.

INMAN-BAMBER, N.G.; MUCHOW, M.; ROBERTSON, J. Dry matter partitioning of sugarcane in Australia and South Africa. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 76, n. 1, p. 71-84, 2002.

INMAN-BAMBER, N.G.; McGLINCHEY, M.G. Crop coefficients and water-use estimates for sugarcane based on long-term Bowen ratio energy balance measurements. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 83 n. 1, p. 125-138, 2003.

INMAN-BAMBER, N.G.; LAKSHMANAN, P.; PARK, S. Sugarcane for water-limited environments: theoretical assessment of suitable traits. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 134, p. 95-104, 2012.

JAME, Y.W.; CURTFORTH, H.W. Crop growth models for decision support systems. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, v. 76, p. 9-19, 1996.

JAMES, G. **Sugarcane**. Blackwell, 2 ed., 2004. 216p.

JARVIS, P.G. Coupling of transpiration to the atmosphere in horticultural crops: the omega factor. **Acta Horticulturae**, Pisa, n. 171, p. 187-205, 1985.

JARVIS, P.G.; MCNAUGHTON, K.G. Stomatal control of transpiration: Scaling up from leaf to field. **Advances in Ecological Research**, London, v. 15, p. 1-49, 1986.

JONES, J.W.; HOOGENBOOM, G.; PORTER, C.H.; BOOTE, K.J.; BATCHELOR, W.D.; HUNT, L.A.; WILKENS, P.W.; SINGH, U.; GIJSMAN, A.J.; RITCHIE, J.T. The DSSAT cropping system model. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 18, p. 235-265, 2003.

JONES, M.; PORTER, C.; JONES, J.W.; HOOGENBOOM, G.; SINGELS, A.; SHINE, J.; NAYAMUTH, R.; KINGSTON, G.; CHINORUMBA, S.; VAN DEN BERG, M. Incorporating the DSSAT/CANEGRO sugarcane model into the DSSAT V4 crop modelling system. **Proc. Int. Soc. Sugar Cane Tech**, Mount Edgecombe, v. 26, p. 438-443, 2007.

KEATING, B.A.; ROBERTSON, M.J.; MUCHOW, R.C.; HUTH, N.I. Modelling sugarcane production systems I. Development and performance of the sugarcane module. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 61, p. 253-271, 1999.

KEATING, B.A.; CARBERRY, P.S.; HAMMER, G.L.; PROBERT, M.E.; ROBERTSON, M.J.; HOLZWORTH, D.; HUTH, N.I.; HARGREAVES, J.N.G.; MEINKE, H.; HOCHMAN, Z.; McLEAN, G.; VERBURG, K.; SNOW, V.; DIMES, J.P.; SILBURN, M.; WANG, E.; BROWN, S.; BRISTOW, K.L.; ASSENG, S.; CHAPMAN, S.; McCOWN, R.L.; FREEBAIRN, D.M.; SMITH, C.J. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 18, p. 267-288, 2003.

KINGSTON, G. Benchmarking yield of sugarcane from estimates of water use. In: **Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technology**, Brisbane, p. 201-209, 1994.

LACLAU, P.B.; LACLAU, J.P. Growth of the whole root system for a plant crop of sugarcane under rainfed and irrigated environments in Brazil. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 114, p. 351-360, 2009.

LISSEN, S.N.; INMAN-BAMBER, N.G.; ROBERTSON, M.J.; KEATING, B.A. The historical and future contribution of crop physiology and modeling research to sugarcane production systems. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, n. 2/3, p. 321-335, 2005.

LIU, D.L.; BULL, T.A. Simulation of biomass and sugar accumulation in sugarcane using a process-based model. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 144, p. 181-211, 2001.

MACHADO, E.C.; PEREIRA, A.R.; FAHL, J.I.; ARRUDA, J.V.; CIONE, J. Índices biométricos de duas variedades de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 17, n. 9, p. 1323-1329, 1982.

MACHADO, E.C. Fisiologia da produção da cana-de-açúcar: crescimento. In: PARANHOS, S.B. **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargil, 1987. v. 1, p. 56-87.

MACHADO, R.S.; RIBEIRO, R.V.; MARCHIORI, P.E.R.; MACHADO, D.F.S.P.; MACHADO, E.C.; LANDELL, M.G.A. Respostas biométricas e fisiológicas ao déficit hídrico em cana-de-açúcar em diferentes fases fenológicas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, n. 12, p. 1575-1582, 2009.

MANZATTO, C.V.; ASSAD, E.D.; BACCA, J.F.M.; ZARONI, M.J.; PEREIRA, S.E.M. **Zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009. 55p.

MARIN, F.R.; ANGELOCCI, L.R.; COELHO FILHO, M.A.; VILLA NOVA, N.A. Construção e avaliação de psicrômetro aspirado de termopar. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 58, n. 4, p. 839-844, 2001.

MARIN, F.R. **Evapotranspiração e transpiração máxima em cafezal adensado**. 2003. 134p. Tese (Doutorado em Agrometeorologia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

MARIN, F.R.; ANGELOCCI, L.R.; RIGHI, E.Z.; SENTELHAS, P.C. Evapotranspiration and irrigation requirements of a coffee plantation in Southern Brazil. **Experimental Agriculture**, Cambridge, v. 41, n. 2, p. 187-197, 2005.

MARIN, F.R.; RIBEIRO, R.V.; ANGELOCCI, L.R.; RIGHI, E.Z. Fluxo de seiva pelo método de balanço de calor: base teórica, qualidade das medidas e aspectos práticos. **Bragantia**, Campinas, v. 67, n. 1, p. 1-12, 2008.

MARIN, F.R.; PELLEGRINO, G.Q.; ASSAD, E.D.; PINTO, H.S.; ZULLO JUNIOR, J. Cana de Açúcar. In: MONTEIRO, J.E.B.A. (Ed.). **Agrometeorologia dos cultivos: O fator meteorológico na produção agrícola**. Brasília, DF: INMET, 2009. p.111-130.

MARIN, F.R.; ANGELOCCI, L.R. Irrigation requirements and transpiration coupling to the atmosphere of a citrus orchard in Southern Brazil. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 98, p. 1091-1096, 2011.

MARIN, F.R.; JONES, J.W.; ROYCE, F.; SUGUITANI, C.; DONZELI, J.L.; PALLONE FILHO, W.J.; NASSIF, D.S.P. Parameterization and evaluation of predictions of DSSAT/CANEGRO for sugarcane Brazilian production systems. **Agronomy Journal**, Madison, v. 103, p. 100-110, 2011.

MARIN, F.R.; THORNBURN, P.J.; NASSIF, D.S.P.; COSTA, L.G.; REZENDE, R.; ANDRADE JÚNIOR, A.S. Evaluation of APSIM-SUGAR and DSSAT-CANEGRO for a widely grown Brazilian sugarcane cultivar. In: CONGRESS OF INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGARCANE TECHNOLOGISTS, 28., 2013.São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2013a.

MARIN, F.R.; JONES, J.W.; SINGELS, A.; ROYCE, F.; ASSAD, E.D.; PELLEGRINO, G.Q.; JUSTINO, F. Climate change impacts on sugarcane attainable yield in southern Brazil. **Climatic Change**, London, v. 117, p. 227-239, 2013b.

MARIN, F.R. **Introdução à micrometeorologia e evapotranspiração**. Piracicaba: CALQ, 2013. Departamento Editorial. 126p.

MARIN, F.R.; JONES, J.W. Process-based simple model for simulating sugarcane growth and production. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 71, p. 1-17, 2014.

MARIN, F.R. **Eficiência de produção da cana-de-açúcar brasileira: estado atual e cenários futuros baseados em simulações multimodelos**. 2014. 262p. Tese (Livre Docência) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

MASCHIO, R. **Produtividade da água em biomassa e energia para 24 variedades de cana-de-açúcar**. 2011. 87p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

MAZZUCHELLI, M.F.; SPILLMAN, M.F.; MUCHOW, R.C. **Minimum dataset manual for the collection of crop, soil and climate data in sugarcane**. St. Lucia: CSIRO, 1997. 65p.

MEDEIROS, S.R.R. **Utilização da técnica de co-krigagem com inclinação máxima e altitude do terreno no delineamento de zonas de manejo: granulometria do solo e disponibilidade hídrica**. 2012. 98p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

MOZAMBANI, A.E.; PINTO, A.S.; SEGATO, S.V.; MATTIUZ, C.F.M. História e morfologia da cana-de-açúcar, In: SEGATO, S.V.; PINTO, A.S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J.C.M. Atualização em produção de cana-de-açúcar, **Atualização em produção de Cana-de-Açúcar**. Piracicaba: - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 2006. p.11-18

MUCHOW, R.C.; SPILLMAN, M.F.; WOOD, A.W.; THOMAS, M.R. Radiation interception and biomass accumulation in a sugarcane crop grown under irrigated tropical conditions. **Australian Journal of Agricultural Research**, Brisbane, v. 45, p. 37-49, 1994.

MUCHOW, R.C.; ROBERTSON, M.J.; WOOD, A.W.; KEATING, B.A. Effect of nitrogen on the time-course of sucrose accumulation in sugarcane. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 47, p. 143-153, 1996a.

MUCHOW, R.C.; ROBERTSON, M.J.; WOOD, A.W. Growth of sugarcane under high input conditions in tropical Australia. II. Sucrose accumulation and commercial yield. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 48, p. 27-36, 1996b.

NASSIF, D.S.P. **Parametrização e avaliação do modelo DSSAT/CANEGRO para variedades brasileiras de cana-de-açúcar**. 2010. 98p. Dissertação (Mestrado em Ciências – Física do Ambiente Agrícola) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

NASSIF, D.S.P.; MARIN, F.R.; PALLONE FILHO, W.J.; RESENDE, R.S.; PELLEGRINO, G.Q. Parametrização e avaliação do modelo DSSAT/Canegro para variedades brasileiras de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 3, p. 311-318, 2012.

NASSIF, D.S.P.; MARIN, F.R.; COSTA, L.G. **Padrões mínimos para coleta de dados experimentais para estudos sobre crescimento e desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar**. Campinas: EMBRAPA, 2013. 28p.

O’LEARY, G.J. A review of three sugarcane simulation models with respect to their prediction of sucrose yield. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 68, p. 97-111, 2000.

OLIVIER, F.C.; SINGELS, A. The effect of crop residue layers on evapotranspiration, growth and yield of irrigated sugarcane. **Water SA**, Pretoria, v. 38 n. 1, p. 77-86, 2012.

PARANHOS, S.B. **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargil, 1987. v. 1, p. 46-87.

PEREIRA, A.R.; MACHADO, E.C. Um simulador dinâmico do crescimento de uma cultura de cana-de-açúcar. **Bragantia**, Campinas, v. 45, n. 1, p. 107-122, 1986.

PEREIRA, L.S.; OEWIS, T.; ZAIRI, A. Irrigation management under water scarcity. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 57, p. 175-206, 2002.

PEREIRA, A.R. The Priestley–Taylor parameter and the decoupling factor for estimating reference evapotranspiration. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 125, p. 305-313, 2004.

PEREZ, P.J.; CASTELLVI, F.; IBÁÑEZ, M.; ROSELL, J.I. Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 97, p. 141-150, 1999.

RIDESA (2013). **Censo varietal brasileiro da safra 2012/2013**. Disponível em: <<http://ridesa.agro.ufg.br/pages/44741-confira-o-censo-varietal-brasil-2012>>. Acesso em Set. 2013.

RIGHI, E.Z. **Balanço de energia e evapotranspiração de cafezal adensado em crescimento sob irrigação localizada**. 2004. 151p. Tese (Doutorado em Física do Ambiente Agrícola) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

RIPOLI, T.C.C.; Ripoli, M.L.C.; CASAGRANDE, D.V.; IDE, B.Y. **Plantio de cana-de-açúcar: estado da arte**. Piracicaba, 2006. 216p.

ROBERTS, J.; NAYAMUTH, R.A.; BATCHELOR, C.H.; SOOPRAMANIAN, G.C. Plant-water relations of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) under a range of irrigated treatments. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 17, p. 95-115, 1990.

ROBERTSON, M.J.; MUCHOW, R.C. Future research challenges for efficient crop water use in sugarcane production. In: AUSTRALIAN SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGY, Brisbane, 1994. **Proceedings...**Brisbane, 1994. p. 193-200.

ROBERTSON, M.J.; WOOD, A.W.; MUCHOW, R.C. Growth of sugarcane under high input conditions in tropical Australia. I. Radiation use, biomass accumulation and partitioning. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 48, p. 11-25, 1996.

RODRIGUES, J.D. **Fisiologia da cana-de-açúcar**. Botucatu: UNESP, 1995. 75p.

ROSENBERG, N.J.; BLAD, B.L.; VERMA, S. B. **Microclimate: the biological environment**. New York: John Wiley, 1983. 495p.

ROSENZWEIG, C.; JONES, J.W.; HATFIELDS, J.L.; RUANE, A.C. The Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project (AgMIP): Protocols and pilot studies. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 170, p. 166-182, 2013.

SALES, C.R.G.; RIBEIRO, R.V.; MACHADO, D.F.S.P.; MACHADO, R.S.; DOVIS, V.L.; LAGÔA, A.M.M.A. Trocas gasosas e balanço de carboidratos em plantas de cana-de-açúcar sob condições de estresses radiculares. **Bragantia**, Campinas, v. 71, n. 3, p. 319-327, 2012.

SAKURATANI, T. A heat balance method for measuring water sap flow in the stem of intact plant. **Journal of Agricultural Meteorology**, Tokyo, v.39, p.9-17, 1981.

SAKURATANI, T.; ABE, J. A heat balance method for measuring water sap flow in the stem of intact plants and its application to sugarcane plants. **Japan Agricultural Research Quarterly**, Tsukuba, v.19, n.2, p.92-97, 1985.

SANTOS, M.A.L. **Irrigação suplementar da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*): Um modelo de análise de decisão para o Estado de Alagoas**. 2005. 100p. Tese (Doutorado em

Agronomia) – Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2005.

SCARPARI, M.S. **PREDPOL**: Um modelo de previsão de maturação da cana-de-açúcar visando planejamento otimizado. 2005. 120p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

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

SILVA, L.C. da. **Crescimento e acúmulo de nutrientes em sete cultivares de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) na região de Coruripe-AL**. 2007. 104p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 2007.

SILVA, T.G.F. **Análise do crescimento, interação biosfera-atmosfera e eficiência do uso de água da cana-de-açúcar irrigada no submédio do vale do São Francisco**. 2009. 176p. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

SILVA, T.G.F.; ZOLNIER, S.; MOURA, M.S.B.; CARMO, J.F.A.; RIBEIRO, A. Fator de desacoplamento em um canavial irrigado no Submédio do Vale do São Francisco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.16, n.8, p.849-858, 2012a.

SILVA, T.G.F.; MOURA, M.S.B.; ZOLNIER, S.; SOARES, J.M.; VIEIRA, V.J.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, 2012b.

SILVA NETO, H.F.; DE PAULI, F.A.; TASSO JUNIOR, L.C.; MARQUES, M.O. Porcentagem de sacarose aparente e potencial produtivo de açúcar em cultivares de cana. **Scientia Agropecuaria**, Lima, v. 5, p. 53-58, 2014.

SINGELS, A.; BEZUIDENHOUT, C.N. A new method of simulating dry matter partitioning in the DSSAT/CANEGRO sugarcane model. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 78, p. 151-164, 2002.

SINGELS, A.; JONES, M.; VAN DER BERG, M. **DSSAT v.4.5 DSSAT/CANEGRO**: Sugarcane Plant Module; scientific documentation. Mount Edgecombe: International Consortium for Sugarcane Modeling, South African Sugarcane Research Institute, 2008. 34p.

SMITH, D.M.; INMAN-BAMBER, N.G.; THORBURN, P.J. Growth and function of the sugarcane root system. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, p. 169-183, 2005.

SMITH, M.A.; SINGELS, A. The response of sugarcane canopy development to water stress. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 98, p. 97-106, 2006.

SOLER, C.M.T **Uso do modelo CERES-MAIZE para previsão de safra do milho “safrinha”**. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004. 146p.

SOUZA, E.F.; BERNARDO, S.; CARVALHO, J.A. Função de produção da cana-de-açúcar em relação à água para três cultivares, em Campos dos Goytacazes, RJ. **Engenharia Agrícola**, Botucatu, v. 19, n. 1, p. 28- 42, 1999.

STEDUTO, P.; HSIAO, T.C. Maize canopies under two soil water regimes. II. Variation in coupling with the atmosphere and the role of leaf area index. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 89, p. 201-213, 1998.

SUGUITANI, C.; MATSUOKA, S. Efeitos do fósforo nas características industriais e na produtividade agrícola em cana-de-açúcar (cana planta) cultivada em duas regiões do estado de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 28., 2001, Londrina. **Ciência do solo: fator de produtividade competitiva com sustentabilidade; resumos...** Londrina: SBCS, 2001. p. 119.

SUGUITANI, C. **Entendendo o crescimento e produção da cana de açúcar**: avaliação do modelo Mosaic. 2006. 60p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

THORBURN, P.J.; MEIER, E.A.; PROBERT, M.E. Modelling nitrogen dynamics in sugarcane systems: Recent advances and applications. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, n. 2/3, p. 337-351, 2005.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. Trad. E.R. Santarém et al. 4. ed. Porto Alegre: Artemed, 2009. 819p.

THORNLEY, J.H.M.; JOHNSON, I.R. **Plant and crop modelling** – A mathematical approach to plant and crop physiology. New Jersey: The Blackburn Press, 2000. 669p.

TOLEDO FILHO, M. da R. **Estudo micrometeorológico de um cultivo de cana-de-açúcar em Alagoas**. 2001. 150p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2001.

VAN DILLEWIJIN, C. **Botany of sugarcane**. Waltham: Chronica Botanica, 1952. 371p.

VIANNA, M.S.; SENTELHAS, P.C. Simulação do risco de déficit hídrico em regiões de expansão do cultivo de cana-de-açúcar no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 49, n. 4, p. 237-246, 2014.

WACLAWOVSKY, A.J.; SATO, P.M.; LEMBKE, C.G.; MOORE, P.H.; SOUZA, G.M. Sugarcane for bioenergy production: na assessment of yield and regulation of sucrose content. **Plant Biotechnology Journal**, New Jersey, v. 8, n. 3, p. 263-276, 2010.

WALLACH, D.; GOFFINET, B.; BERGES, J.E.; DEBAEKE, P.; LEENHARDT, D.; AUBERTOT, J.N. Parameter estimation for crop models: A new approach and application to a corn model. **Agronomy Journal**, Madison, v. 93, n. 4, p. 757-766, 2001.

WALLACH, D.; MAKOWSKI, D.; JONES, J.W. **Working with dynamic crop models**: evaluation, analysis, parameterization and applications. Amsterdam: Elsevier, 2006. 449p.

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

WILLMOTT, C.J. Some comments on the evaluation of model performance. **Bulletin of American Meteorology Society**, Albuquerque, v. 63, p. 1309-1313, 1982.

WOOD, A.W.; MUCHOW, R.C.; ROBERTSON, M.J. Growth of sugarcane under high input conditions in tropical Australia. III. Accumulation, partitioning and use of nitrogen. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 48, p. 223-233, 1996.

WRIGHT, J.L.; JENSEN, M.E. Peak water requirements of crops in southern Idaho. In: **Proceedings of American Society of Civil Engineering**, 1972, p. 193-201.

ZEGGAF, A.T.; TAKEUCHI, S.; DEHGHANISANIJ, H.; ANYYOJI, H.; YANO, T. A Bowen ratio technique for partitioning energy fluxes between maize transpiration and soil surface evaporation. **Agronomy Journal**, Madison, v. 100, n. 4, p. 988-996, 2008.

ZHOU, M.M.; SINGELS, A.; SAVAGE, M.J. Physiological parameters for modelling differences in canopy development between sugarcane cultivars. In: **Proceedings of the South African Sugar Technologists Association**, 2003. p. 610-621.