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

**Avaliação de modelo agrometeorológico para tolerância
de genótipos de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) ao déficit
hídrico**

José Felipe Gonzaga Sabadin

**Dissertação apresentada para obtenção
do título de Mestre em Ciências. Área de
concentração: Fitotecnia**

**Piracicaba
2013**

José Felipe Gonzaga Sabadin
Engenheiro Agrônomo

**Avaliação de modelo agrometeorológico para tolerância de
genótipos de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) ao déficit hídrico**

Orientador:
Prof Dr. **KLAUS REICHARDT**

Dissertação apresentada para a obtenção do
título de Mestre em Ciências. Área de
concentração: Fitotecnia

**Piracicaba
2013**

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

Sabadin, José Felipe Gonzaga

Avaliação de modelo agrometeorológico para tolerância de genótipos de cana-de-açúcar
(*Saccharum spp.*) ao déficit hídrico / José Felipe Gonzaga Sabadin. - - Piracicaba, 2013.
76 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2013.
Bibliografia.

1. Cana-de-açúcar 2. Déficit hídrico 3. Modelagem 4. Tolerância diferencial I. Título

CDD 633.61
S114a

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

Aos meus pais Ronaldo e Loreta,
que com muito amor, dedicação, esforço e paciência
permitiram que minhas conquistas fossem alcançadas.
A minha eterna gratidão.

Ao meu avô Salu (*in memoriam*),
que mesmo ausente, sei que continua ao meu lado.

DEDICO

À minha namorada Paula,
pelo incentivo, carinho e compreensão

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por mais um degrau alcançado, pelas experiências vividas nesse período e pelo milagre da vida.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” e ao Departamento de Produção Vegetal pela oportunidade de realizar o curso de mestrado.

Ao meu orientador Professor Dr. Klaus Reichardt pela amizade, apoio e incentivo durante o período do mestrado. Agradeço a compreensão pelas faltas que, por ventura, eu tenha cometido.

Ao Professor Dr. Durval Dourado Neto pelo incentivo, ensinamentos e pelo apoio dado durante essa importante jornada.

Ao Centro de Cana do Instituto Agronômico de Campinas (Programa Cana/IAC), em especial, ao Dr. Marcos Guimarães de Andrade Landell pela disponibilização dos dados para o trabalho e pelo entusiasmo que contagiava a todos.

Aos meus pais, Ronaldo e Loreta, pelo amor, carinho e apoio incondicional. Obrigado por sempre me incentivarem a continuar estudando. Sempre serei grato!

À minha namorada Paula pela ajuda com a correção, pelo companherismo, carinho e compreensão que foram fundamentais durante todo esse período.

A toda minha família, em especial, às minhas avós Itália e Maria, minhas tias Anita e Raquel, meu tio Álvaro e meu primo Rene que sempre me confortaram e apoiaram quando eu mais precisei.

Ao meu chefe Dr. Michel Choairy de Moraes, pela confiança depositada em mim e pela compreensão com o tempo dedicado em realizar esse trabalho.

Ao Dr. Maximiliano Salles Scarpari pelas contribuições que foram fundamentais ao desenvolvimento do trabalho e a disponibilidade em sempre contribuir.

Aos ex-colegas de trabalho, e hoje amigos, José Leonel Pasqualinotto, Rodolfo Alves Dias e Carlos Suguitani, pela paciência, em contribuir de maneira significativa com a minha formação, e pelo incentivo em ingressar nesse curso.

Aos colegas de trabalho, Jorge Corrêa, Paulo Vale, Matheus Bulgarelli e Gustavo Silva pelo apoio e compreensão com o tempo dedicado para a realização desse trabalho.

À Luciane Toledo, pelo incentivo, pelos esclarecimentos e pela atenção dada sempre com uma visão otimista.

Enfim, a todas as pessoas que contribuíram de uma maneira ou de outra, para que esse trabalho fosse possível.

“Demore o tempo que for para decidir o que você quer da vida, e depois que decidir não recue ante nenhum pretexto, porque o mundo tentará te dissuadir”

Profeta Zaratustra (Friedrich Nietzsche)

SUMÁRIO

RESUMO.....	11
ABSTRACT	13
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	15
LISTA DE TABELAS	17
1 INTRODUÇÃO	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 Aspectos gerais da cana-de-açúcar	21
2.2 Importância econômica da cana-de-açúcar	23
2.3 Fatores climáticos que influenciam a produção da cana-de-açúcar.....	25
2.4 O déficit hídrico nas plantas	27
2.5 O déficit hídrico na cana-de-açúcar.....	29
2.6 Uso de modelos matemáticos na agricultura.....	30
2.7 Método da Zona Agroecológica.....	32
3 MATERIAL E MÉTODOS	33
3.1 Obtenção dos dados de produtividade real	33
3.2 Obtenção dos dados meteorológicos	36
3.3 Estimativa da produtividade potencial (PP) em cada ensaio.....	38
3.3.1 Determinação da produtividade potencial bruta padrão (PPB _P)	39
3.3.2 Determinação dos coeficientes de correção da produtividade potencial.....	40
3.4 Estimativa da produtividade atingível (PA) para cada ensaio.....	42
3.4.1 Determinação do balanço hídrico.....	42
3.4.2 Estimativa da produtividade potencial atingível (PA).....	45
3.5 Parametrização e calibração do modelo de estimativa das produtividades potencial e atingível.....	46
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	49
4.1 Parametrização e calibração do Modelo FAO	49

4.2	Calibração do Modelo FAO para os ciclos de produção (planta e soca)	52
4.3	Calibração do Modelo FAO para as épocas de colheita (outono, inverno e primavera).....	55
4.4	Avaliação da sensibilidade dos genótipos de cana-de-açúcar ao déficit hídrico	59
5	CONCLUSÕES.....	69
	REFERÊNCIAS	71

RESUMO

Avaliação de modelo agrometeorológico para tolerância de genótipos de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) ao déficit hídrico

O aumento da demanda por energias renováveis proporcionou um intenso crescimento do setor sucroenergético. Essa expansão fez com que a cana-de-açúcar passasse a ocupar novas regiões agrícolas, em especial o Cerrado brasileiro. No entanto, essas novas regiões enfrentam grandes desafios para a produção da cultura, no qual o déficit hídrico é o de maior importância. Sabendo-se disso, o conhecimento da tolerância diferencial de genótipos de cana-de-açúcar ao déficit hídrico, se torna importante ferramenta para o manejo do sistema de produção. O Método da Zona Agroecológica (MZA), também conhecido como Modelo da FAO, estima a produtividade potencial e atingível das culturas agrícolas, mediante a entrada de variáveis meteorológicas. O Modelo da FAO determina que a depleção da produtividade ocorre em função do déficit hídrico relativo ($1 - E_{Tr}/ETC$), através de um coeficiente de resposta ao déficit hídrico, denominado K_y . Nesse sentido, o presente trabalho teve como objetivo verificar a tolerância de genótipos de cana-de-açúcar ao déficit hídrico, mediante o uso desse modelo. Para isso, foram necessários os dados de produtividade real de 18 genótipos em 79 ensaios diferentes do Programa de Melhoramento Genético de Cana-de-açúcar do Instituto Agrônomo de Campinas (Programa Cana/IAC), entre os anos de 2009 a 2011. Os dados meteorológicos utilizados pelo modelo, para cada experimento e período, foram obtidos das estações meteorológicas mais próximas para cada local. Visto os dados dos coeficientes de resposta ao déficit hídrico (K_y), existentes na literatura, não condizerem com estudos sobre os estádios fenológicos de maior sensibilidade ao estresse hídrico, o modelo foi calibrado e os resultados foram condizentes com diversos autores. O período de maior sensibilidade à deficiência hídrica, encontrado pelo modelo, foi o estágio de desenvolvimento máximo da cultura, ou seja, o período de alongação dos colmos, onde o valor de K_y é 0,72. O Método da Zona Agroecológica estimou a produtividade atingível com um índice de concordância de 0,75, o que é considerado bom para os modelos de estimativa. As estimativas, para cada genótipo, mostraram valores de erro médio que variaram de -1,7 a 5,4 t.ha⁻¹. Considerando a verificação da tolerância diferencial dos genótipos de cana-de-açúcar ao déficit hídrico, o Modelo da FAO identificou os genótipos IACSP974039, IACSP994010 e RB867515 como os de maior tolerância.

Palavras-chave: Cana-de-açúcar; Déficit hídrico; Modelagem; Tolerância diferencial

ABSTRACT

Agrometeorological model evaluation for sugarcane (*Saccharum spp.*) genotype tolerance to water stress

The increased demand for renewable energy lead to an intense growth of the sugarcane industry. This expansion made the sugarcane pass to occupy other restrictive environments, especially regions with high water deficit. Knowing this, the knowledge of the differential tolerance of sugarcane genotypes to water stress becomes an important tool for the management of the production system. The Agroecological Zone Method (AZE), also known as FAO Model, estimates the potential and actual productivities of crops from meteorological variables. This model determines the depletion of productivity as a function of the relative water deficit ($1 - E_{Tr}/E_{Tc}$) and a water deficit sensitivity index, named K_y . Accordingly, this study aimed to determine the tolerance of sugarcane genotypes to water stress, through this model to estimate the potential and actual productivities. For this, real productivity data of 18 sugarcane genotypes grown in 79 different trials were taken from the Sugarcane Breeding Program from the Agronomic Institute of Campinas (Programa Cana/IAC) between the years 2009-2011. The meteorological data used by the model, for each experiment and period, was obtained from the closest meteorological stations. Since the original data water deficit sensitivity index (K_y) and duality found in the literature, in other studies, due to periods of greatest sensitivity to water stress, the model was calibrated and consistent results were obtained in relation to several authors. It was found that the period of greatest sensitivity of the sugarcane occurs at the stage of stem elongation, when the value of K_y is 0.72. The Agroecological Zone Method estimated the actual productivity with a performance index of 0.75, which is considered good. Estimation showed values of mean bias error, estimated for each genotype, ranged from -1.7 to 5.4 t.ha⁻¹. Regarding the verification of the tolerance of the different genotypes to water stress, the FAO Model identified the genotypes IACSP974039, IACSP994010 and RB867515 as those of greatest tolerance to water stress.

Keywords: Sugarcane; Water stress; Modelling; Differential tolerance

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 – Estádios fenológicos da cana-de-açúcar. a) rebolos (mudas) utilizados para o plantio; b) início da brotação das gemas e da emissão dos primórdios radiculares; c) início do perfilhamento; d) perfilhamento intenso; e) início da maturação e acúmulo de sacarose no interior dos colmos; f) colmos industrializáveis com concentração ótima de sacarose; g) colheita (corte) dos colmos; h) brotação das soqueiras (CHEAVEGATTI-GIANOTTO, et al., 2011)22
- Figura 2 – Ciclos produtivos da cana-de-açúcar e variações na temperatura e pluviosidade na região Centro-Sul do Brasil (CASTRO, 1999).....23
- Figura 3 – Crescimento da área cultivada com cana-de-açúcar, no mundo e no Brasil, nos últimos dez anos (FAO, 2011)25
- Figura 4 – Época de plantio e colheita para os diferentes ciclos de produção35
- Figura 5 – Relação entre os dados observados de produtividade (PA_{obs}) e os dados estimados de produtividade atingível pelo modelo da FAO (PA_{est}), considerando os 79 ensaios analisados: A) Ky originais; B) Ky ajustados50
- Figura 6 – Relação entre os dados observados de produtividade (PA_{obs}) e os dados estimados de produtividade atingível pelo modelo da FAO (PA_{est}), utilizando os valores originais de Ky: A) ensaios de cana-planta; B) ensaios de cana-soca.....53
- Figura 7 – Relação entre os dados observados de produtividade (PA_{obs}) e os dados estimados de produtividade atingível pelo modelo da FAO (PA_{est}), utilizando os valores ajustados de Ky: A) ensaios de cana-planta; B) ensaios de cana-soca.....54
- Figura 8 – Relação entre os dados observados de produtividade (PA_{obs}) e os dados estimados de produtividade atingível pelo modelo da FAO (PA_{est}), utilizando os valores originais de Ky: A) colheita de outono; B) colheita de inverno; C) colheita de primavera.....56

Figura 9 – Relação entre os dados observados de produtividade (PA_{obs}) e os dados estimados de produtividade atingível pelo modelo da FAO (PA_{est}), utilizando os valores ajustados de K_y : A) colheita de outono; B) colheita de inverno; C) colheita de primavera	58
Figura 10 – Relações entre as produtividades observadas e as estimadas pelo modelo FAO para cada genótipo avaliado.....	63
Figura 11 – Relação entre as produtividades médias observadas e estimadas pelo Modelo FAO para os 18 genótipos avaliados	66
Figura 12 – Produtividade em toneladas de colmos por hectare para os genótipos de cana-de-açúcar, considerando todos os ensaios: A) produtividade média observada; B) produtividade média estimada	67
Figura 13 – Quebra de produtividade, em porcentagem, estimada para os genótipos de cana-de-açúcar, considerando todos os ensaios.....	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais países produtores de cana-de-açúcar em 2011.....	24
Tabela 2 – Genótipos de cana-de-açúcar e respectiva participação nos ensaios, considerando os diferentes ciclos de produção (cana-planta e soca) e as épocas de colheita.....	34
Tabela 3 – Ensaios do Programa de Melhoramento de Cana-de-açúcar do IAC, as respectivas épocas de colheita e as datas de início e término de cada ensaio.....	36
Tabela 4 – Localização geográfica das estações meteorológicas utilizadas para cada localidade	37
Tabela 5 – Valores do índice de área foliar (IAF) para cada ciclo de produção e estágio fenológico da cultura da cana-de-açúcar (Doorenbos e Kassam, 1994)	41
Tabela 6 – Coeficientes de cultura (K_c) da cana-de-açúcar para cada estágio fenológico e respectivos períodos, em meses, para os ciclos de produção (planta e soca).....	44
Tabela 7 – Capacidade de armazenamento de água no solo (CAD) de acordo com os diferentes tipos de ambientes de produção	44
Tabela 8 – Coeficientes de resposta da cultura ao déficit hídrico (K_y) da cana-de-açúcar para cada estágio fenológico	45
Tabela 9 – Critérios de interpretação do desempenho dos métodos de estimativa, pelo índice “c” (Camargo e Sentelhas, 1997)	47
Tabela 10 – Comparação entre os coeficientes estatísticos obtidos para o Modelo da FAO com os valores originais de K_y (Doorenbos e Kassam, 1994) e com os valores ajustados de K_y	51
Tabela 11 – Valores dos coeficientes de resposta ao déficit hídrico (K_y), para cada estágio fenológico, obtido após a calibração do modelo da FAO	52
Tabela 12 – Valores dos coeficientes de resposta ao déficit hídrico (K_y) ajustados para cada estágio fenológico obtido após a calibração do modelo da FAO,	

considerando os diferentes ciclos de produção (cana-planta e cana-soca)	53
Tabela 13 – Valores dos coeficientes de resposta ao déficit hídrico (K_y), ajustados para cada estágio fenológico, obtido após a calibração do modelo da FAO, considerando as diferentes épocas de colheita	57
Tabela 14 – Comparação entre os coeficientes obtidos para o modelo de FAO com e sem o ajuste dos valores de K_y para cada época de colheita	59
Tabela 15 – Produtividades potencial e atingível estimadas pelo modelo da FAO, produtividade observada e parâmetros estatísticos para a avaliação do desempenho do modelo.....	64
Tabela 16 – Coeficiente de resposta ao déficit hídrico (K_y) para cada estágio fenológico, para os genótipos de cana-de-açúcar avaliados	65

1 INTRODUÇÃO

A expansão da cultura da cana-de-açúcar ocorrida nos últimos anos foi ocasionada basicamente pelo aumento do consumo de açúcar, decorrente do crescimento populacional, e da utilização do etanol como fonte alternativa ao uso de combustíveis fósseis, que oneram e causam grande impacto ambiental. Aliada a isso, a possibilidade do uso da biomassa da cana-de-açúcar para a cogeração de energia elétrica se torna cada vez mais interessante devido aos preços praticados e ao fato de ser uma fonte de energia renovável, visto a quantidade de fitomassa produzida que pode ser utilizada para esse fim.

Essa situação fez com que a cana-de-açúcar, anteriormente limitada à região Sudeste e ao litoral nordestino, passasse a ocupar novas áreas agrícolas, em especial o Centro Oeste brasileiro. No entanto, essas novas regiões produtoras enfrentam grandes desafios para a produção dessa cultura, sendo o déficit hídrico o de maior importância, pois apresentam má distribuição da pluviosidade e a predominância de solos de baixa capacidade de armazenamento de água.

Segundo Pimentel (2004), a baixa disponibilidade hídrica é a principal causa da redução da produtividade, e quando aliada a ocorrência de elevadas temperaturas promove a redução da área foliar e do crescimento das plantas, além da senescência precoce de folhas (INMAN-BAMBER, 2004). Essas condições são encontradas no Centro Oeste brasileiro, o que evidencia a necessidade de maior aporte tecnológico, como o uso da irrigação e o desenvolvimento de genótipos mais adaptados a essas condições ambientais.

Como a maioria das áreas canavieiras do Cerrado brasileiro não possui capacidade de irrigação, e o aumento do uso da água para esse fim não é a melhor estratégia, visto que esse aumento é considerado ambientalmente insustentável, o desenvolvimento de genótipos com capacidade de sustentar níveis adequados de produtividade em ambientes com deficiência hídrica, torna-se a principal ferramenta para a viabilização da cultura nessas regiões de expansão.

Sabendo-se disso, a escolha da variedade de cana-de-açúcar mais adaptada às condições edafoclimáticas, em especial ao déficit hídrico que ocorre nessas regiões, é de extrema importância, pois a escolha do genótipo errado pode acarretar em um prejuízo de vários anos. Nesse contexto, a determinação da sensibilidade

desses genótipos ao déficit hídrico se torna ferramenta importante para a tomada de decisão na escolha da variedade que será utilizada.

Os modelos de produtividade são ferramentas que simulam a produtividade das culturas em função das condições climáticas que ocorrem no ambiente. Uma das maneiras de se conhecer o impacto do déficit hídrico na produtividade é mediante o uso de modelos agrometeorológicos, que simulam a produtividade potencial (interação do genótipo com a temperatura, fotoperíodo e radiação solar) e a atingível (efeito dessas interações penalizadas pelo déficit hídrico), de acordo com as condições meteorológicas vigentes na região.

O conhecimento da sensibilidade de espécies ou genótipos ao déficit hídrico pode ser observado através da determinação do coeficiente de sensibilidade ao déficit hídrico (K_y). Esse índice é derivado de uma regressão linear entre o déficit de evapotranspiração (relação entre a evapotranspiração real e máxima da cultura) e a perda relativa de produtividade (relação entre a produtividade atingível e potencial).

Nesse sentido, o presente trabalho teve por objetivos: i) calibrar e testar o Método da Zona Agroecológica (Modelo FAO) para a estimativa das produtividades atingível e potencial da cultura da cana-de-açúcar; ii) identificar a tolerância de genótipos de cana-de-açúcar ao déficit hídrico, mediante o uso do Modelo da FAO para a estimativa da produtividade atingível e potencial e a determinação do coeficiente de sensibilidade ao déficit hídrico (K_y) para cada genótipo. Para isso, como fontes dos dados de produtividade real, foram utilizados os dados da rede experimental do Programa de Melhoramento Genético de Cana-de-açúcar do Instituto Agrônomo de Campinas (Programa Cana/IAC).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aspectos gerais da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) é uma planta alógama, semiperene, pertencente à família *Poaceae*, gênero *Saccharum*. A planta da cana-de-açúcar é considerada uma gramínea tropical que se desenvolve em uma touceira composta por múltiplos perfilhos, cada qual contendo uma série de nós separados por entrenós. Nesses entrenós, durante o período de maturação, ocorre o acúmulo e armazenamento de sacarose (MOORE e NUSS, 1987).

A origem da cana-de-açúcar ainda hoje é bastante discutida, no entanto, a maioria dos autores relata que, possivelmente, esta cultura seja originária do sudeste da Ásia, na grande região da Nova Guiné e Indonésia (DANIELS e ROACH, 1987).

Daniels e Roach (1987) e Matsuoka (2005) afirmam que, atualmente, os cultivares de cana-de-açúcar em cultivo são híbridos clonais, geralmente de 6ª a 10ª geração, constituídos por contribuições das espécies *S. officinarum*, *S. barberi*, *S. sinense*, *S. spontaneum* e *S. robustum*. Segundo Pedrozo (2006), procura-se, geralmente, aliar a rusticidade de espécies como *S. spontaneum*, às boas qualidades dos cultivares nobres de *S. officinarum*.

Segundo Magalhães (1987), a cana-de-açúcar é cultivada nas regiões tropicais e subtropicais, numa ampla faixa de latitude, desde cerca de 35° N a 30° S e em altitudes que variam desde o nível do mar até 1.000 metros. Considerada uma planta de metabolismo C4, pois forma compostos orgânicos com quatro carbonos durante o processo de fotossíntese, apresenta uma alta taxa fotossintética e eficiência na conversão de energia radiante em energia química (SEGATO et al., 2006; RODRIGUES, 1995).

Após a instalação da cultura, ou seja, o plantio das mudas (rebolos), a cana-de-açúcar é cultivada em média por 5 anos (cortes), fato esse dependente da variedade utilizada e das condições de manejo em que se encontra o canavial. Para o primeiro ciclo produtivo, ou seja, a planta oriunda da brotação das mudas utilizadas no plantio, denomina-se cana-planta. Para os demais ciclos, ou seja, aqueles oriundos da rebrota após a colheita, denomina-se cana-soca (Figura 1).

Figura 1 – Estádios fenológicos da cana-de-açúcar. a) rebolos (mudas) utilizados para o plantio; b) início da brotação das gemas e da emissão dos primórdios radiculares; c) início do perfilhamento; d) perfilhamento intenso; e) início da maturação e acúmulo de sacarose no interior dos colmos; f) colmos industrializáveis com concentração ótima de sacarose; g) colheita (corte) dos colmos; h) brotação das soqueiras (CHEAVEGATTI-GIANOTTO, et al., 2011)

Tradicionalmente o plantio da cana-de-açúcar é realizado em duas épocas distintas: plantio de cana-de-ano-e-meio e plantio de cana-de-ano (BARBIERI e VILLA NOVA, 1977). O plantio de cana-de-ano-e-meio é realizado entre os meses de janeiro a abril, enquanto o plantio de cana-de-ano é realizado de setembro a dezembro.

Com o aumento da área produtiva das usinas/destilarias e a expansão da cana-de-açúcar para outras regiões de maior déficit hídrico, foi dado início ao plantio entre os meses de maio a agosto, chamado de cana-de-inverno. Esse último, em regiões de elevado déficit hídrico, é altamente utilizado como estratégia para a manutenção da produtividade, visto que, para os demais plantios, a época em que o déficit hídrico ocorre coincide com o estágio em que a planta possui um elevado índice de área foliar (IAF) e consequentemente uma elevada demanda hídrica. Essa situação promove um aumento da sensibilidade da planta à falta de água e em alguns casos, a morte da gema apical, causando problemas de brotação lateral precoce dos colmos, o que leva a necessidade de reforma da área afetada.

Em relação ao ciclo de produção, o plantio da cana-de-ano-e-meio possui um ciclo, geralmente, de 18 meses, enquanto que o plantio da cana-de-ano e da cana-de-inverno apresentam ciclos de 12 meses. Após o primeiro corte, ou seja, para a

cana-soca, o ciclo produtivo passa a ser de 12 meses (ALFONSI, et al., 1987; MONTEIRO, 2012).

Castro (1999) exemplifica que a produtividade da cana-de-ano-e-meio é maior do que a da cana-de-ano em função não apenas da duração do ciclo, mas também em decorrência das condições climáticas que ocorrem em cada momento fenológico. O período em que as condições climáticas (temperatura e pluviosidade) são favoráveis para o crescimento da cana-de-ano é limitado, pois o mesmo ocorre durante a época de plantio. Já para a cana-de-ano-e-meio, esse período ocorre no estágio de perfilhamento e crescimento dos colmos, no qual a planta apresenta máximo IAF e taxa de acúmulo de matéria seca (CÂMARA, 1993).

Figura 2 – Ciclos produtivos da cana-de-açúcar e variações na temperatura e pluviosidade na região Centro-Sul do Brasil (CASTRO, 1999)

2.2 Importância econômica da cana-de-açúcar

Segundo a FAO (Food Agriculture Organization), a produção de cana-de-açúcar em 2011 foi de 1.794.359.190 de toneladas de colmos, inseridos em uma área de 25.436.924 de hectares. Desse montante, apenas dez países são responsáveis por 83,78% da produção mundial, sendo que Brasil e Índia são responsáveis por aproximadamente 60% da produção do globo.

Tabela 1 – Principais países produtores de cana-de-açúcar em 2011

	Países	Produção (t)	Relação		Área (ha)	PA ³ (kg/ha)
			P/M ¹	PAC ²		
01.	Brasil	734.006.000	40,91	-	9.601.320	76.448
02.	Índia	342.382.000	19,08	59,99	4.944.390	69.247
03.	China	115.123.560	6,42	66,40	1.730.700	66.519
04.	Tailândia	95.950.400	5,35	71,75	1.259.240	76.197
05.	Paquistão	55.308.500	3,08	74,83	987.700	55.997
06.	México	49.735.300	2,77	77,60	713.824	69.675
07.	Filipinas	34.000.000	1,89	79,50	439.698	77.326
08.	EUA	26.655.800	1,49	80,98	353.130	75.484
09.	Austrália	25.181.800	1,40	82,39	308.104	81.732
10.	Argentina	25.000.000	1,39	83,78	350.000	71.429
	Outros	291.015.830	16,22	100,00	4.748.818	-
	Mundo	1.794.359.190	-	100,00	25.436.924	70.542

¹ P/M = relação percentual País / Mundo.

² PAC = Acúmulo percentual em relação ao Mundo.

³ PA = Produtividade Agrícola.

Fonte: FAO (2011)

O Brasil se consolida como o maior produtor de cana-de-açúcar, com cerca de 40% da produção mundial, ocupando uma área de 9.601.320 de hectares (FAO, 2011). Em função do interesse do etanol como fonte energética substituta aos combustíveis fósseis e o aumento do consumo de açúcar, observou-se nos últimos anos uma forte expansão das áreas cultivadas com a cultura no Brasil. Segundo a UNICA (União da Indústria de Cana-de-açúcar), a área cultivada cresceu 84% nos últimos dez anos, saindo de 5.206.656 ha, em 2002, para 9.616.615 ha em 2011. Outro ponto importante a destacar é que a expansão da cana-de-açúcar como cultura agrícola no mundo basicamente se deu em território nacional, visto que o crescimento mundial da área cultivada foi praticamente o mesmo ocorrido no Brasil (Figura 3).

Considerando o cenário brasileiro, o estado de São Paulo é o maior produtor de cana-de-açúcar com uma área cultivada de aproximadamente 4,42 milhões de hectares, correspondendo a 52,07% da área nacional na safra 2012/13, seguido por Goiás com 8,55% (725,91 mil hectares), Minas Gerais com 8,51% (721, 88 mil hectares), Paraná com 7,20% (610,83 mil hectares), Mato Grosso do Sul com 6,34% (542,70 mil hectares) e Alagoas com 5,25% (445,71 mil hectares). Os demais estados produtores apresentam área cultivada inferior a 5%. Em relação à

produtividade agrícola, a média brasileira no ano safra 2012/13, foi de 69.407 kg/ha (CONAB, 2013).

O complexo sucroalcooleiro apresentou o terceiro maior saldo na balança comercial do agronegócio brasileiro em 2012, obtendo um saldo, entre exportações e importações, de US\$ 14,5 bilhões, correspondendo a 18,36% do montante total (MAPA, 2012).

Figura 3 – Crescimento da área cultivada com cana-de-açúcar, no mundo e no Brasil, nos últimos dez anos (FAO, 2011)

2.3 Fatores climáticos que influenciam a produção da cana-de-açúcar

O entendimento da influência dos fatores ambientais no crescimento e desenvolvimento de uma cultura é fundamental, uma vez que estão diretamente ligados a vários processos metabólicos (MONTEITH, 1976; INMAN-BAMBER, 1994). Nesse sentido, pesquisas direcionadas a fatores ambientais, interagem ou complementam as demais linhas de pesquisa ligadas à produção vegetal. O melhoramento vegetal é uma dessas linhas de pesquisa que analisam os efeitos dos fatores ambientais nas diferentes características morfológicas e fisiológicas em genótipos previamente selecionados, visando definir as variedades mais adequadas para uma dada localidade.

Para Ide e Oliveira (1986) e Barbieiri (1993), o clima é o fator que mais influencia na produtividade da cana-de-açúcar. Como o Brasil apresenta uma grande variabilidade climática, em função da sua grande extensão territorial, a cana-de-açúcar encontra desde regiões que possuem o clima adequado para o seu desenvolvimento até regiões que apresentam limitações térmicas e/ou hídricas. Nessas regiões, onde a restrição térmica e/ou hídrica limita o crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar, o uso de variedades selecionadas para essas

condições e o emprego de recursos extras podem viabilizar economicamente a atividade canavieira (ANDRÉ, 2010).

Devido à cana-de-açúcar ser uma planta de ciclo semiperene, a mesma sofre influência das variações climáticas durante todo o ano. Para a planta atingir elevados valores de sacarose por hectare, é necessário que ocorra condições de temperatura e umidade adequadas para permitir o máximo crescimento na fase vegetativa, seguido de um período de restrição hídrica ou térmica para favorecer o acúmulo de sacarose no colmo (TERAMOTO, 2003). Barbieri e Villa Nova (1977) afirmam que o ambiente ideal para a produção de cana-de-açúcar é aquele onde a precipitação é bem distribuída durante o período de crescimento da planta, seguido de um período relativamente seco, antes da colheita, para o acúmulo de sacarose no interior dos colmos. Os mesmos autores citam que a luminosidade deve ser alta durante toda a estação de produção, pois há correlação entre a incidência luminosa e a produção de açúcar.

Para Waldron et al. (1967) apud Marchiori (2004), os parâmetros que mais afetam a bioconversão de energia na cana-de-açúcar são: luz (intensidade e qualidade), concentração de CO₂, disponibilidade de água e nutrientes e temperatura.

Vários autores definem que a temperatura é o fator de maior importância para a maturação fisiológica da cana, visto que, além de afetar a absorção de água e nutrientes por meio do fluxo transpiratório, é um condicionante não controlável (OMETTO, 1980; IDE e OLIVEIRA, 1986; MAGALHÃES, 1987; BARBIERI, 1993).

Segundo Fauconier e Bassereau (1975), a temperatura ótima para o crescimento da cana-de-açúcar está entre 30 e 34°C, enquanto que, abaixo de 25°C e acima de 35°C o crescimento é muito lento, e a partir de 38°C o crescimento é nulo. Barbieri e Villa Nova (1977) e Doorembos e Kassan (1979) citam que a temperatura basal está em torno de 20°C.

Como a cana-de-açúcar é uma planta de metabolismo C₄, apresentando uma alta eficiência na conversão de energia luminosa em energia química, a luminosidade e a radiação solar também se colocam como fatores importantes para a produção de fitomassa, principalmente sabendo-se que a cana-de-açúcar atinge uma área foliar 7 vezes maior do que área ocupada do solo, no estágio de máximo desenvolvimento (FAUCONIER e BASSEREAU, 1975). Essa característica confere a

cultura uma elevada capacidade fotossintética e de assimilação de CO₂, conferindo altos valores de fitomassa por unidade de área.

2.4 O déficit hídrico nas plantas

A água é essencial para a produção das culturas agrícolas, pois é necessária para o processo de crescimento e expansão celular. Sabe-se que 90% da água requerida pelas plantas terrestres “não” é utilizada em nenhuma rota bioquímica, sendo perdida através da transpiração (MORISON, 2008). Entretanto, é através do processo transpiratório que ocorre a absorção de nutrientes fundamentais para o desenvolvimento da planta e a translocação interna de solutos.

Ortolani e Camargo (1987) afirmam que a frequência e a intensidade do déficit hídrico constituem os fatores de maior importância à limitação da produção agrícola mundial, sendo responsáveis por 60 a 70% da variabilidade final da produção. Esse fato evidencia a importância do conhecimento das condições climáticas locais e do genótipo a ser utilizado, no intuito de desenvolver estratégias de manejo que possibilitem reduzir os efeitos causados pela deficiência hídrica.

Segundo Bray (1997), o déficit hídrico nas plantas ocorre quando a taxa transpiratória excede a absorção de água, o que pode ser causado por vários mecanismos diferentes, incluindo: seca, salinidade e baixas temperaturas. Esse estresse provoca alterações no comportamento vegetal, cuja irreversibilidade vai depender da espécie, do genótipo, da duração do estresse, da severidade do estresse, do estágio de desenvolvimento da planta e da natureza do estresse (KRAMER; BOYER, 1995; SANTOS, 1998).

A resposta mais proeminente das plantas ao déficit hídrico consiste no decréscimo de produção da área foliar, do fechamento dos estômatos, da aceleração da senescência e da abscisão foliar (MCCREE; FERNÁNDEZ, 1989; TAI; ZEIGER, 2004). Considerando o âmbito celular, Bray (1997) cita que o déficit hídrico causa concentração de solutos no interior das células, mudanças de volume e formato da membrana plasmática, perda de turgor e denaturação de proteínas.

Um aspecto importante em todos os estudos dedicados à tolerância das plantas ao déficit hídrico é a avaliação do grau de tolerância e susceptibilidade de diferentes genótipos. Em vários estudos a identificação da tolerância e da

susceptibilidade de cultivares é baseada em poucas medidas fisiológicas que estão ligadas à resposta à seca (CATTIVELLI et al., 2008).

A capacidade da planta em responder e sobreviver ao estresse hídrico celular depende dos mecanismos internos que integram as respostas celulares, sendo que tais respostas podem ocorrer em alguns segundos ou em poucos minutos ou horas (BRAY, 1997).

Basicamente os mecanismos de resistência ao estresse hídrico são separados em quatro tipos: limitação do crescimento, para minimizar a perda de água; adaptações morfológicas; adaptações fisiológicas; e alterações metabólicas (ARTLIP; WISNIEWSKI, 2001). Os três primeiros são processos complexos, conhecidos incompletamente, porém, progressos significantes já foram obtidos no entendimento das alterações metabólicas.

Um das principais variáveis metabólicas que apresentam maior sensibilidade à seca é a taxa fotossintética. Sabe-se que as plantas podem continuar realizando fotossíntese por tempo superior àquele destinado ao crescimento em expansão, pois o estômato responde mais lentamente no início do estresse hídrico que o turgor celular, responsável pelo alongamento de células que causa à expansão foliar (INMAN-BAMBER; SMITH, 2005).

Em resposta ao estresse, Larcher (2004) afirma que um organismo vegetal atravessa uma sucessão de fases características: a *fase de alarme*, em que ocorre a perda de estabilidade das estruturas e das reações que mantêm as funções vitais (processos bioquímicos e metabolismo de produção de energia), na qual também a planta pode reagir e se restituir do estresse imposto; a *fase de resistência*, a qual é aumentada sob estresse contínuo, iniciando um processo de rusticidade, no qual, dependendo da duração, a planta pode apresentar adaptação através de ajustamento osmótico; e a *fase de exaustão*, que ocorre quando o estresse é muito demorado ou sua intensidade aumenta rapidamente, deixando a planta susceptível às infecções que ocorrem como consequência da diminuição das defesas do hospedeiro e levando ao colapso prematuro.

Nesse contexto, Smit e Singels (2006) e Bray (1997) afirmam que o conhecimento adequado de como os vegetais responde ao estresse hídrico é um dos principais requisitos para escolher, tanto a melhor variedades como as melhores práticas de manejo, visando, sobretudo, aperfeiçoar a exploração dos recursos naturais.

2.5 O déficit hídrico na cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar apresenta grande variabilidade genética em relação à tolerância ao estresse hídrico, sendo alguns genótipos capazes de tolerar estresses severos e mesmo assim, completar o seu ciclo, enquanto outros não sobrevivem ou sofrem danos severos na sua produção (GUIMARÃES, 2011). Esta variabilidade é uma ferramenta de extrema importância para o desenvolvimento de genótipos tolerantes. Sob condições de estresse, o desempenho de genótipos-elite em relação aos genótipos tradicionais é melhor, e esta diferença é devida principalmente a uma maior tolerância aos estresses e não ao aumento da produtividade *per se* (DUVICK, et al., 2004).

Segundo Thompson (1976), os períodos de deficiência hídrica podem ocorrer durante todo o ciclo da cultura, mas seu efeito sobre a produtividade da cana-de-açúcar varia em função da interação entre época do ano em que ocorrem e a fase do ciclo fenológico da cultura.

Rosenfeld (1989) estudando o período crítico de deficiência hídrica para cana-planta, concluiu que o início do estágio de máximo desenvolvimento da cana-planta é o período mais sensível ao déficit hídrico. Para a cana-de-açúcar plantada em fevereiro e junho, o período mais crítico é o do 4º ao 8º mês de idade; já para a cana plantada em outubro, o período mais crítico é do 8º ao 11º mês. As maiores reduções de produção são provocadas por períodos secos durante o verão em canas com idade de 4 a 8 meses, assim como o período de seca para o crescimento da cana-planta.

Nos primeiros meses a quantidade de água necessária à cultura é relativamente pequena, porém, quando a planta encontra-se em pleno estágio de desenvolvimento vegetativo, são exigidas grandes quantidades de água (FAUCONNIER; BASSEREAU, 1975). Desta forma, a cana-de-açúcar necessita de 250 partes de água para formar uma parte de matéria seca durante todo o período de crescimento (LARCHER, 2004).

Doorenbos e Kassam (1979) também afirmam que o efeito da deficiência de água varia com o estágio de desenvolvimento da cana, entretanto afirmam que o primeiro estágio é o mais sensível a deficiências hídricas.

Outro ponto importante é o tempo de exposição à seca, o qual afeta negativamente o crescimento da parte aérea, sobretudo a produção de folhas, acelerando a senescência foliar e da planta como um todo, ocasionando uma redução na interceptação da radiação, na eficiência do uso de água e na fotossíntese, bem como ao aumento da radiação transmitida para a superfície do solo (INMAN-BAMBER, 2004).

Dois mecanismos morfofisiológicos que a cultura apresenta para evitar a seca são: o enrolamento foliar (reduzindo a projeção de área foliar, e, por conseguinte, a radiação incidente); e o fechamento estomático, limitando a transpiração (LISSON, et al., 2005). Esses mecanismos podem variar, consideravelmente, entre os genótipos de cana-de-açúcar, podendo ser correlacionados com a tolerância à seca (INMAN-BAMBER; SMITH, 2005), daí a importância do estudo em variedades específicas.

2.6 Uso de modelos matemáticos na agricultura

A aplicação de modelos matemático-fisiológicos na agricultura tem sido cada vez mais utilizada no que tange ao fornecimento de ferramentas para sistemas de suporte às tomadas de decisão. O homem vem utilizando, mesmo que inconscientemente, simulações reais de futuros processos para estar pronto para enfrentar os acontecimentos. (MONTEIRO, 2012; DOURADO NETO, et al., 1998).

Os sistemas agrícolas são, por natureza, complexos, o que torna o uso dos modelos de simulação bastante útil em diversas práticas agrícolas e na caracterização dos ambientes de produção. Ainda nesse contexto, devido ao avanço na área de informática e processamento de dados, atualmente é possível fazer diversas simulações utilizando esses modelos.

Estudos são dirigidos, visando à elaboração de modelos matemáticos para estimar o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade das culturas (JONES & KINIRY, 1986; LISSON et al., 2005; OLIVEIRA et al., 2012). Em geral, esses modelos correlacionam os elementos ambientais com processos fisiológicos e com a produção das culturas, o que é possível em virtude da evolução do conhecimento dos processos fisiológicos vegetais e dos sistemas computacionais. A maioria dos modelos de crescimento considera a radiação solar como a variável principal de

entrada (KEATING et al., 1999; LIU & BULL, 2001; SCARPARI & BEAUCLAIR, 2009), uma vez que esta variável é a fonte de energia para a fixação do CO₂ atmosférico. Porém apenas uma porcentagem da radiação solar é utilizada na fotossíntese, que corresponde à parte da energia da faixa do espectro solar entre os comprimentos de onda de 400 a 700 nanômetros (nm).

Na utilização de modelo de simulação, principalmente de modelos de simulação de culturas agrícolas, é de extrema importância que se conheça de maneira aprofundada a fisiologia da planta, ou seja, como são os processos fisiológicos envolvidos, não apenas o acúmulo de massa, e como a cultura age em processos de absorção de energia e transformação dessa energia em carboidratos.

Segundo Suguitani (2006), a complexidade do sistema biológico e a falta de conhecimento em relação a alguns processos faz com que a modelagem fique sempre imperfeita ou incompleta. Isso ocorre também em função da grande capacidade das plantas de se adaptarem a diversas condições edafoclimáticas, em especial a cana-de-açúcar, que é uma planta de metabolismo C₄ e apresenta um ciclo longo, permitindo assim a recuperação da produtividade perdida em uma fase anterior.

A utilização de modelos de simulação não é apenas para a estimativa da produtividade, mas também para outros fins, como a caracterização do ciclo das culturas e o planejamento da época de semeadura e colheita (ROBERTSON, 1983). Considerando a estimativa da produção das culturas, a maioria dos modelos penaliza a produtividade potencial em função do déficit hídrico apresentado durante o ciclo. Thompson (1970) afirma que a precipitação é o elemento meteorológico mais empregado no desenvolvimento de modelos que estimam a produtividade das culturas.

Considerando a utilização de modelos agrometeorológicos para sistemas de previsão de safra agrícola, alguns trabalhos são de grande importância em nível nacional, no caso de grandes cultura como a soja (ASSAD et al., 2007; CAMARGO, et al., 1986), milho (ANDRIOLI; SENTELHAS, 2009), e cana-de-açúcar (PEREIRA; MACHADO, 1986; BARBIERI, 1993; SCARPARI, 2002).

2.7 Método da Zona Agroecológica

O Método da Zona Agroecológica, também conhecido como Modelo da FAO, é um modelo genérico, que possui ampla aplicação em estudos não apenas de simulação da produtividade de culturas, mas também em estudos condizentes ao zoneamento agroclimático e na determinação de épocas mais apropriadas para o plantio e semeadura. Esse modelo é segmentado em duas etapas: a primeira relacionada à estimativa da produtividade potencial (PP) e a segunda à penalização dessa pelo déficit hídrico, obtendo-se a produtividade atingível (PA) (MONTEIRO, 2012).

Segundo Doorembos e Kassam (1994) esse método pressupõe que a produtividade de uma cultura bem adaptada ao respectivo ambiente de crescimento, sem limitações hídricas e nutricionais e sem a ocorrência de doenças e pragas, é condicionada apenas pela interação entre as características genéticas da cultura e as variáveis climáticas (radiação solar, temperatura do ar e fotoperíodo) (DE WIT, 1965).

Em relação ao impacto do déficit hídrico na produtividade da cultura, Doorembos e Kassam (1994) propuseram que a quebra de produtividade potencial ($1 - PA/PP$) se relaciona diretamente ao déficit hídrico relativo da cultura ($1 - ET_r/ET_m$), por meio de um coeficiente de resposta da cultura ao déficit hídrico (K_y) em cada fase fenológica do ciclo. Por meio dessas relações, é possível estimar a produtividade atingível da cultura.

Apesar de necessitar de informações do clima e da cultura, o Método da Zona Agroecológica é de fácil aplicação em termos operacionais. Além disso, esse método é de fácil entendimento e os resultados se aproximam da realidade. Entretanto, o modelo apresenta algumas limitações, pois não são consideradas a ocorrência de pragas e doenças e a fertilidade do solo (GOUVÊA, 2008).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Obtenção dos dados de produtividade real

Para o desenvolvimento desse trabalho foram utilizados os dados de produtividade agrícola de 45 ensaios da rede experimental do Programa de Melhoramento Genético de Cana-de-açúcar do Instituto Agronômico de Campinas (Centro de Cana/IAC), sendo 43 ensaios colhidos em cana-planta e 36 ensaios colhidos em cana-soca, totalizando um universo de 79 ensaios. Esses ensaios correspondem a Etapa Estadual 2009, a qual consiste na avaliação de um grupo de genótipos, em diferentes condições edafoclimáticas, para a verificação da interação genótipo x ambiente. Nessa etapa também são caracterizadas as condições de manejo desses materiais, ou seja, à adaptabilidade a diferentes tipos de solo, época de plantio, determinação das curvas de maturação para o ponto ótimo de colheita, reação às condições ambientais e de manejo.

Na Tabela 2 encontram-se os genótipos de cana-de-açúcar avaliados nesse trabalho. Foram avaliados 18 genótipos, sendo 17 considerados clones-elite que estão na etapa final de seleção do Programa Cana/IAC, e uma variedade comercial (RB867515) utilizada como padrão para as devidas comparações de desempenho entre esses materiais.

Tabela 2 – Genótipos de cana-de-açúcar e respectiva participação nos ensaios, considerando os diferentes ciclos de produção (cana-planta e soca) e as épocas de colheita.

(continua)

Variedades	Planta				Soca				
	Out	Inv	Pri	n _p	Out	Inv	Pri	n _s	n _t
IACSP974039	19	10	13	42	14	10	11	35	77
IACSP974048	20	10	13	43	15	10	11	36	79
IACSP982030	20	10	13	43	15	10	11	36	79
IACSP983020	19	10	13	42	14	10	11	35	77
IACSP983021	20	10	13	43	15	10	11	36	79
IACSP991305	19	10	13	42	14	10	11	35	77
IACSP991308	20	10	13	43	15	10	11	36	79

Tabela 2 – Genótipos de cana-de-açúcar e respectiva participação nos ensaios, considerando os diferentes ciclos de produção (cana-planta e soca) e as épocas de colheita.
(conclusão)

Variedades	Planta				Soca				
	Out	Inv	Pri	n _p	Out	Inv	Pri	n _s	n _t
IACSP991352	19	10	13	42	14	10	11	35	77
IACSP991418	19	10	13	42	14	10	11	35	77
IACSP991419	20	10	13	43	15	10	11	36	79
IACSP992110	20	10	13	43	15	10	11	36	79
IACSP992121	20	10	13	43	15	10	11	36	79
IACSP994007	20	10	13	43	15	10	11	36	79
IACSP994008	19	10	13	42	14	10	11	35	77
IACSP994010	20	10	13	43	15	10	11	36	79
IACSP994011	19	10	13	42	14	10	11	35	77
IACSP994013	19	10	13	42	14	10	11	35	77
RB867515	20	10	13	43	15	10	11	36	79

Out = outono; Inv = inverno; Pri = primavera;
n_p = número total de ensaios em cana-planta;
n_s = número total de ensaios em cana-soca;
n_t = número total de ensaios (ambos os ciclos).

Considerando os ensaios avaliados, os mesmos foram conduzidos entre os anos de 2009 e 2011, sendo o plantio realizado entre os meses de fevereiro a maio de 2009. O primeiro corte (colheita) desses ensaios ocorreu durante os meses de abril a novembro de 2010 (cana-planta) e o segundo corte (cana-soca) entre os meses de abril a novembro de 2011. Todos os experimentos estavam delineados em blocos casualizados com 3 repetições.

Como forma de categorizar esses ensaios, os mesmos foram separados de acordo com a época de colheita, ou seja, outono, inverno e primavera. Na Figura 4 observa-se um esquema da época de colheita desses ensaios, em que a letra “P” refere-se ao período no qual esses ensaios foram plantados, a letra “C” refere-se a período de colheita, e a letra “I” refere-se ao início do ciclo de cana-soca, ou seja, o período de colheita da cana-planta (ciclo anterior).

Estágio	Mat.	2009					2010					2011													
		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Cana-Planta	Outono	P	P	P	P									C	C	C									
	Inverno	P	P	P	P									C	C										
	Primavera	P	P	P	P																				
Cana-Soca	Outono													I	I	I									
	Inverno																								
	Primavera																								

Figura 4 – Época de plantio e colheita para os diferentes ciclos de produção

Na Tabela 3 encontram-se as informações dos ensaios utilizados nesse trabalho. Para cada ensaio pode-se observar a localidade (usina), épocas de colheita para os ciclos de produção de cana-planta e cana-soca, as respectivas datas de início e término desses ciclos e a duração de dias dos mesmos. Entre os experimentos avaliados, 11 ensaios não possuem os dois ciclos de produção. Para os demais, a época de colheita pode ou não ser alterada em função da data de colheita (término).

Tabela 3 – Ensaios do Programa de Melhoramento de Cana-de-açúcar do IAC, as respectivas épocas de colheita e as datas de início e término de cada ensaio

(continua)

Ens.	Local	Ép.	Planta			Soca			
			Plantio	Colheita	ND	Ép.	Corte	Colheita	ND
1	ALTA MOGIANA	Out.	20/02/2009	11/05/2010	445	Out.	11/05/2010	12/05/2011	366
2	ALVORADA	Out.	24/03/2009	15/05/2010	417	-	-	-	-
3	BARRA	Out.	01/02/2009	22/06/2010	506	-	-	-	-
4	BONFIM	Out.	05/05/2009	01/06/2010	392	Inv.	01/06/2010	02/08/2011	427
5	CATANDUVA	Out.	23/04/2009	20/05/2010	392	-	-	-	-
6	COLORADO	Out.	30/03/2009	14/05/2010	410	Out.	14/05/2010	24/05/2011	375
7	COSTA PINTO		-	-	-	Out.	09/06/2010	17/06/2011	373
8	DENUSA	Out.	18/03/2009	25/05/2010	433	Out.	25/05/2010	12/05/2011	352
9	GOIASA	Out.	15/04/2009	13/05/2010	393	-	-	-	-
10	GUARANI	Out.	24/02/2009	20/05/2010	450	Out.	20/05/2010	11/06/2011	387
11	IRACEMA	Out.	04/03/2009	28/05/2010	450	Out.	28/05/2010	17/06/2011	385
12	ITAPAGIPE	Out.	24/03/2009	22/05/2010	424	Out.	22/05/2010	15/05/2011	358
13	JALLES	Out.	14/05/2009	13/05/2010	364	Out.	13/05/2010	26/05/2011	378
14	MANDU	Out.	25/03/2009	25/05/2010	426	Inv.	25/05/2010	25/07/2011	426
15	MOEMA	Out.	01/03/2009	22/05/2010	447	Out.	22/05/2010	07/05/2011	350
16	SANTA CRUZ	Out.	30/04/2009	12/04/2010	347	Out.	12/04/2010	27/04/2011	380
17	SANTA FE 1	Out.	23/02/2009	18/05/2010	449	Out.	18/05/2010	13/05/2011	360
18	SANTA FE 2	Out.	23/02/2009	23/06/2010	485	Inv.	23/06/2010	09/08/2011	412

Tabela 3 – Ensaios do Programa de Melhoramento de Cana-de-açúcar do IAC, as respectivas épocas de colheita e as datas de início e término de cada ensaio.

(conclusão)

Ens.	Local	Ép.	Planta			Ép.	Soca		
			Plantio	Colheita	ND		Corte	Colheita	ND
19	SAO MARTINHO	Out.	27/02/2009	31/05/2010	458	Out.	31/05/2010	02/06/2011	367
20	TANABI	Out.	06/03/2009	24/05/2010	444	Out.	24/05/2010	01/06/2011	373
21	VALE VERDAO	Out.	31/03/2009	27/05/2010	422	Out.	27/05/2010	02/06/2011	371
22	ALTA MOGIANA	Inv.	20/02/2009	24/07/2010	519	Inv.	24/07/2010	09/08/2011	381
23	BONFIM	Inv.	05/05/2009	28/07/2010	449	Pri.	28/07/2010	12/10/2011	441
24	COLORADO	Inv.	30/03/2009	24/08/2010	512	Inv.	24/08/2010	03/08/2011	344
25	COSTA PINTO	Inv.	25/03/2009	21/08/2010	514	Inv.	21/08/2010	22/08/2011	366
26	DENUSA	Inv.	18/03/2009	11/08/2010	511	Inv.	11/08/2010	30/08/2011	384
27	GUARANI 1	Inv.	24/02/2009	11/08/2010	533	Out.	11/08/2010	11/06/2011	304
28	GUARANI 2	Inv.	24/02/2009	11/08/2010	533	-	-	-	-
29	IRACEMA	Inv.	04/03/2009	25/08/2010	539	Inv.	25/08/2010	16/08/2011	356
30	JALLES	Inv.	14/05/2009	27/07/2010	439	Inv.	27/07/2010	28/07/2011	366
31	MOEMA	Inv.	01/03/2009	31/08/2010	548	Inv.	31/08/2010	24/08/2011	358
32	BARRA	Pri.	01/02/2009	03/09/2010	579	-	-	-	-
33	CATANDUVA	-	-	-	-	Pri.	12/10/2010	06/10/2011	359
34	COLORADO	Pri.	30/03/2009	11/11/2010	591	Pri.	11/11/2010	30/10/2011	353
35	DENUSA	Pri.	18/03/2009	18/10/2010	579	Pri.	18/10/2010	06/10/2011	353
36	IRACEMA	Pri.	04/03/2009	16/11/2010	622	Pri.	16/11/2010	22/10/2011	340
37	ITAPAGIPE 1	Pri.	24/03/2009	03/09/2010	528	-	-	-	-
38	ITAPAGIPE 2	Pri.	24/03/2009	26/10/2010	581	-	-	-	-
39	JALLES	Pri.	14/05/2009	16/10/2010	520	Pri.	16/10/2010	01/09/2011	320
40	MANDU	Pri.	25/03/2009	22/10/2010	576	Pri.	22/10/2010	28/09/2011	341
41	MOEMA	Pri.	01/03/2009	30/10/2010	608	Pri.	30/10/2010	05/10/2011	340
42	SANTA CRUZ	Pri.	30/04/2009	25/10/2010	543	-	-	-	-
43	SANTA FE	Pri.	23/02/2009	08/10/2010	592	Pri.	08/10/2010	18/10/2011	375
44	SAO MARTINHO	Pri.	27/02/2009	15/10/2010	595	Pri.	15/10/2010	11/10/2011	361
45	TANABI	Pri.	06/03/2009	09/09/2010	552	Out.	09/09/2010	20/09/2011	376

ND = número de dias do ciclo produtivo.

3.2 Obtenção dos dados meteorológicos

Os dados meteorológicos foram obtidos da estação meteorológica mais próxima para cada local analisado. Os dados foram coletados da rede de estações meteorológicas do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) e da rede de estações meteorológicas do Instituto Agrônomo de Campinas (CIIAGRO - IAC).

Para cada localidade foram obtidos os dados diários de temperatura máxima do ar (°C), temperatura mínima do ar (°C) e precipitação (mm). Na Tabela 4 estão

listadas as localidades e as coordenadas das respectivas estações meteorológicas utilizadas.

Tabela 4 – Localização geográfica das estações meteorológicas utilizadas para cada localidade

Usina	Localização da estação utilizada		
	Cidade	Latitude (°)	Longitude (°)
ALTA MOGIANA	Guaíra / SP	-20,31	-48,31
ALVORADA	Itumbiara / GO	-18,41	-49,21
BARRA	Jaú / SP	-22,29	-48,56
BONFIM	Jaboticabal / SP	-21,27	-48,32
CATANDUVA	Catanduva / SP	-21,11	-48,93
COLORADO	Guaíra / SP	-20,31	-48,31
COSTA PINTO	Piracicaba / SP	-22,73	-47,65
DENUSA	Rio Verde / GO	-17,80	-50,91
GOIASA	Itumbiara / GO	-18,41	-49,21
GUARANI	Colina / SP	-20,71	-48,54
IRACEMA	Piracicaba / SP	-22,73	-47,65
ITAPAGIPE	Votuporanga / SP	-20,42	-49,97
JALLES	Pirenópolis / GO	-15,85	-48,96
MANDU	Guaíra / SP	-20,31	-48,31
MOEMA	Votuporanga / SP	-20,42	-49,97
SANTA CRUZ	Araraquara / SP	-21,79	-48,18
SANTA FE	Araraquara / SP	-21,79	-48,18
SAO MARTINHO	Jaboticabal / SP	-21,27	-48,32
TANABI	São José do Rio Preto / SP	-20,82	-49,38
VALE VERDAO	Rio Verde / GO	-17,80	-50,91

Para a utilização do Método da Zona Agroecológica da FAO são necessários os dados de temperatura média do ar (°C), precipitação (mm), radiação solar extraterrestre (Q_0), fotoperíodo (N) e insolação (n). Os valores de temperatura média do ar, radiação solar extraterrestre e fotoperíodo foram determinados de acordo com os dados obtidos, a latitude e a época do ano, por meio de equações astronômicas apresentadas por Pereira et al. (2002).

Devido a limitação dos dados de insolação (n) para as localidades desejadas, os mesmos foram estimados de acordo com a combinação das equações de Angström-Prescott (PEREIRA et al., 2002) eq (1) e Hargreaves (ALLEN et al., 1998) eq (2).

$$\frac{Q_r}{Q_0} = 0,29 \cos \Phi + 0,52 \left(\frac{n}{N} \right) \quad (1)$$

$$\frac{Q_r}{Q_0} = 0,16(T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n})^{0,5} \quad (2)$$

em que: Q_r é a radiação solar global expressa em $\text{cal.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1}$; Q_0 é a radiação solar extraterrestre expressa em $\text{cal.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1}$; Φ é a latitude expressa em graus; n é o número de horas efetivas com brilho solar expressa em horas.dia^{-1} ; N é o fotoperíodo diário expresso em horas.dia^{-1} ; $T_{m\acute{a}x}$ é a temperatura máxima do ar expressa em $^{\circ}\text{C}$; e $T_{m\acute{i}n}$ é a temperatura mínima do ar expressa em $^{\circ}\text{C}$.

Mediante a combinação dessas duas equações foi possível estimar o valor de insolação (n) conforme a equação abaixo:

$$n = N \times \left\{ \frac{[0,16(T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n})^{0,5}] - (0,29 \cos \Phi)}{0,52} \right\} \quad (3)$$

Depois de estimados todos os parâmetros necessários, juntamente com os dados obtidos, esses foram ajustados para escala decendial, com o intuito de facilitar as determinações futuras relativas ao balanço hídrico, pois é nessa escala que a planilhas eletrônicas utilizadas foram programadas.

3.3 Estimativa da produtividade potencial (PP) em cada ensaio

A estimativa da produtividade potencial da cultura da cana-de-açúcar para cada localidade, ciclo de produção e época de colheita, foi obtida mediante o uso do Método da Zona Agroecológica (Modelo FAO) descrito por Doorenbos e Kassam (1994). Esse método estima o rendimento máximo de uma cultura em função das condições climáticas vigentes, ou seja, estima o rendimento máximo de uma variedade altamente produtiva e adaptada ao ambiente em que se encontra, considerando todas as suas exigências (hídricas, nutricionais e fitossanitárias) atendidas. Dessa maneira, apenas as características genéticas da cultura e as condições climáticas (temperatura do ar, radiação solar, fotoperíodo e insolação) estariam condicionando essa produtividade (DE WIT, 1965).

A produtividade potencial da cultura (PP) é dada em kg de massa seca por hectare (kg.ha^{-1}) e pode ser expressa da seguinte forma:

$$PP = \sum_{i=1}^m (PPB_P \times C_{IAF} \times C_{RESP} \times C_{COL} \times C_{UM}) \quad (4)$$

em que: i é o índice que varia de 1 a m ; m representa os decêndios do ciclo da cultura; PPB_P é a produtividade bruta de matéria seca de uma cultura padrão com $IAF = 5$ durante todo seu ciclo, expressa em $\text{kg MS.ha}^{-1}.\text{dia}^{-1}$, C_{IAF} é o coeficiente de correção para o índice de área foliar, C_{RESP} é o coeficiente de correção para respiração, C_{COL} é o coeficiente de correção para a parte colhida (índice de colheita), C_{UM} é o coeficiente de correção para a umidade da parte colhida.

3.3.1 Determinação da produtividade potencial bruta padrão (PPB_P)

A produtividade potencial bruta padrão (PPB_P) está relacionada com a produtividade bruta de matéria seca, considerando a quantidade efetiva de brilho solar. A presença ou ausência de nebulosidade altera a quantidade de radiação solar incidente, promovendo uma diferença no aproveitamento da energia radiante pelas folhas das plantas. Visto isso, é extremamente necessário o conhecimento dos valores de insolação (n) para verificar a porção do dia composta por períodos de nebulosidade e períodos de céu claro. Assim, a produtividade potencial bruta padrão pode ser estimada conforme a equação abaixo:

$$PPB_P = PPB_c + PPB_n \quad (5)$$

em que: PPB_c é a produtividade potencial bruta de matéria seca durante o período de céu claro, expressa em $\text{kg MS.ha}^{-1}.\text{dia}^{-1}$; e PPB_n é a produtividade potencial bruta de matéria seca durante o período com nebulosidade, expressa em $\text{kg MS.ha}^{-1}.\text{dia}^{-1}$.

Os valores de PPB_c e PPB_n podem ser estimados de acordo com as equações abaixo:

$$PPB_c = [107,2 + (0,36 Q_0)] \times cTc \times \frac{n}{N} \quad (6)$$

$$PPB_n = [31,7 + (0,219 Q_0)] \times cTn \times \left(1 - \frac{n}{N}\right) \quad (7)$$

em que: cTc é o coeficiente de correção devido à temperatura relativa ao período de dia de céu claro; e cTn é o coeficiente de correção devido à temperatura relativa ao período de dia nublado.

Os coeficientes cTc e cTn variam de acordo com o grupo da cultura, ou seja, de acordo com a espécie e com o mecanismo de fixação de carbono. No caso da cana-de-açúcar, a planta participa do Grupo IV e segundo Barbieri e Tuon (1992), as equações para as estimativas desses coeficientes são:

- Para $T \geq 16,5 \text{ }^\circ\text{C}$

$$cTc = -4,16 + 0,4325 T - 0,00725 T^2 \quad (8a)$$

$$cTn = -1,064 + 0,173 T - 0,0029 T^2 \quad (8b)$$

- Para $T < 16,5 \text{ }^\circ\text{C}$

$$cTc = -9,32 + 0,865 T - 0,0145 T^2 \quad (9a)$$

$$cTn = -4,16 + 0,4325 T - 0,00725 T^2 \quad (9b)$$

3.3.2 Determinação dos coeficientes de correção da produtividade potencial

Após a determinação da produtividade potencial bruta padrão, a mesma deve ser corrigida em função de coeficientes específicos para cada cultura. Esses coeficientes são: coeficiente de índice de área foliar (C_{IAF}), coeficiente de respiração (C_{RESP}), coeficiente de colheita (C_{COL}); e coeficiente de umidade (C_{UM}).

O índice de área foliar (IAF), relação entre a área foliar em m^2 e a área de solo ocupada em m^2 , varia em função da cultura e do estágio fenológico que a mesma se encontra. Sabendo que o modelo considera um valor de $IAF = 5$ constante durante todo o ciclo da cultura, deve-se realizar um ajuste nesse parâmetro, pois o mesmo é variável durante o ciclo da planta. De acordo com Barbieri e Tuon (1992), o C_{IAF} deve ser ajustado em função do $IAF_{\text{máx}}$ atingido durante o ciclo conforme equação abaixo:

$$C_{IAF} = 0,0093 + 0,185 IAF_{m\acute{a}x} - 0,0175 IAF_{m\acute{a}x}^2 \quad (IAF_{m\acute{a}x} \geq 5, C_{IAF} = 0,5) \quad (10)$$

Tendo o objetivo de diferenciar os ciclos de produo, em especial, o ciclo de cana-planta de 12 meses e cana-soca, fez-se uma distino dos valores de IAF, isto , para a cana-planta de 12 meses foi considerado um IAF máximo maior do que o IAF máximo da cana-soca. Na Tabela 5 são apresentados os valores de IAF utilizados para os ciclos de cana-planta (18 meses, 15 meses e 12 meses) e de cana-soca (12 meses).

Tabela 5 – Valores do ndice de área foliar (IAF) para cada ciclo de produo e estádio fenológico da cultura da cana-de-açúcar (Doorenbos e Kassam, 1994)

Estádio fenológico	Planta			Soca
	18 meses	15 meses	12 meses	12 meses
Plantio até 25% do fechamento	2,5	2,0	2,0	2,0
25 a 50% do fechamento	3,0	2,5	2,5	2,5
50 a 75% do fechamento	4,5	3,5	3,0	3,0
75 a 100% do fechamento	5,0	4,0	3,5	3,5
Desenvolvimento máximo	6,0	5,0	4,5	4,0
Início da maturaco	5,0	4,0	4,0	3,5
Maturaco	4,5	3,5	3,5	3,0

Durante o processo de fotossíntese e crescimento da cultura, parte dos carboidratos produzidos  consumida pelo processo de fotorrespiração e outra parte na manuteno dos tecidos vegetais. Esse processo apresenta forte dependência da temperatura, apresentando uma relao direta entre ambos os processos (respirao e temperatura). Visto isso,  necessário considerarmos um coeficiente de respirao na estimativa da produtividade potencial de uma cultura, o qual  dado abaixo:

$$C_{RESP} = 0,6 \text{ para } T < 20 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (11a)$$

$$C_{RESP} = 0,5 \text{ para } T \geq 20 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (11b)$$

em que: T  a temperatura média durante o período considerado.

Na maioria das culturas agrícolas, apenas uma parte da matéria seca total produzida pela cultura é colhida, seja na forma de grão, fibra, fruto, açúcar ou outro. O coeficiente de colheita relaciona a quantidade da matéria seca colhida e a matéria seca total produzida pela planta. No caso da cana-de-açúcar, a parte colhida são os colmos produzidos e segundo Doorenbos e Kassam (1994), esse coeficiente deve ser igual a 0,80.

De maneira semelhante, o coeficiente de umidade tem o objetivo de corrigir a produtividade de matéria seca em função da quantidade de umidade residual (U%) que fica retida na parte colhida, chegando dessa maneira na produtividade final da cultura (PP). No caso da cana-de-açúcar, a umidade residual é igual a 80% (DOORENBOS; KASSAM, 1994). Para essa correção, aplica-se a seguinte relação (PEREIRA et al., 2002):

$$C_{UM} = [1 - (0,01 \times U\%)]^{-1} \quad (12)$$

3.4 Estimativa da produtividade atingível (PA) para cada ensaio

A ocorrência de deficiência hídrica durante o período do ciclo de desenvolvimento do vegetal induz adaptações morfofisiológicas nas plantas, como o fechamento estomático e a redução da área foliar, mediante a aceleração da senescência e da abscisão foliar (TAIZ; ZEIGER, 2004). Essa redução da fotossíntese provocada pelo estresse hídrico causa grandes impactos no crescimento e rendimento das culturas (PEREIRA et al., 2002).

Para a determinação da deficiência hídrica na cultura é preciso estabelecer o balanço hídrico da mesma. Para isso é necessário obter os valores de evapotranspiração da cultura (ETc), que são variáveis em função do estágio fenológico em que ela se encontra, e de precipitação (mm) ocorrida durante o ciclo de desenvolvimento.

3.4.1 Determinação do balanço hídrico

Como se observa na eq (13), a determinação dos valores de evapotranspiração da cultura (ETc) é realizada mediante os valores de

evapotranspiração potencial (ETP) e dos coeficientes de cultura (Kc) para cada estágio fenológico (Tabela 6).

$$ET_c = ETP \times K_c \quad (13)$$

em que: ETc é a evapotranspiração da cultura expressa em mm; ETP é a evapotranspiração potencial expressa em mm; e Kc é o coeficiente de cultura.

A evapotranspiração potencial (ETP) foi estimada pelo método de Thornthwaite (1948), iniciado através do cálculo da evapotranspiração potencial padrão (ETp), que é a evapotranspiração para um mês de trinta dias e com fotoperíodo (N) de doze horas.

A evapotranspiração potencial padrão é estimada pelas seguintes equações:

$$ET_p = 16 \left(10^{\frac{T_{méd}}{I}} \right)^a \quad (0 \leq T_{méd} < 26,5 \text{ °C}) \quad (14a)$$

$$ET_p = -415,85 + (32,24 T_{méd}) - (0,43 T_{méd}^2) \quad (T_{méd} \geq 26,5 \text{ °C}) \quad (14b)$$

sendo:

$$I = 12(0,2 Ta)^{1,514} \quad (15)$$

em que: Ta é a temperatura média anual normal (°C); e

$$a = 0,49239 + (1,7916 \times 10^{-2} \times I) - (7,71 \times 10^{-5} \times I^2) + (6,75 \times 10^{-7} \times I^3) \quad (16)$$

Por fim, foi realizado o cálculo da evapotranspiração potencial (ETP) em função do fotoperíodo (N) e do número de dias do período em questão (NDP) como segue abaixo:

$$ETP = ET_p \times COR \quad (17)$$

$$COR = \frac{NDP}{30} \times \frac{N}{12} \quad (18)$$

Tabela 6 – Coeficientes de cultura (Kc) da cana-de-açúcar para cada estágio fenológico e respectivos períodos, em meses, para os ciclos de produção (planta e soca)

Estádio fenológico	Planta	Soca	Coeficientes de cultura (Kc)
	(meses)		
Plantio até 25% do fechamento (I)	0 – 2	0 – 1	0,40
25 a 50% do fechamento (II)	2 – 3	1 – 2	0,75
50 a 75% do fechamento (III)	3 – 4	2 – 2,5	0,95
75 a 100% do fechamento (IV)	4 – 7	2,5 – 4	1,10
Desenvolvimento máximo (V)	7 – 14	4 – 10	1,25
Início da maturação (VI)	14 – 16	10 – 11	0,95
Maturação (VII)	16 – 18	11 – 12	0,70

Após a obtenção dos dados e evapotranspiração da cultura (ETc) foram determinados os balanços hídricos sequenciais da mesma na escala decendial, através do método de Thornthwaite e Mather (1955). Para isso, foi empregada uma planilha eletrônica elaborada por Rolim et al. (1998), a qual considera que a variação do armazenamento (ARM) de água no solo é uma função exponencial que envolve a capacidade de água disponível (CAD) e a perda de água acumulada (negativo acumulado), função do balanço hídrico entre a precipitação (P) e a evapotranspiração da cultura (ETc). Como resultado, o balanço hídrico fornece as estimativas da evapotranspiração real da cultura (ETr), da deficiência hídrica (DEF), do excedente hídrico (EXC) e do armazenamento de água no solo (ARM) para cada período (PEREIRA et al., 2002).

Devido às diferenças de solos existentes entre os ensaios analisados, os valores de capacidade de armazenamento de água no solo (CAD) para cada ambiente de produção encontram-se na Tabela 7.

Tabela 7 – Capacidade de armazenamento de água no solo (CAD) de acordo com os diferentes tipos de ambientes de produção (PRADO, 2013).

Classes de Ambiente de Produção	CAD
A e B	100 mm
C	75 mm
D e E	50 mm

3.4.2 Estimativa da produtividade potencial atingível (PA)

O modelo descrito por Doorenbos e Kassam (1979) relaciona que a quebra relativa de produtividade ($1 - PA/PP$) está diretamente ligada com o déficit hídrico relativo ($1 - ETr/ETc$), isto é, em momentos que as necessidades hídricas da cultura são plenamente atendidas, a evapotranspiração real da cultura (ETr) é igual a evapotranspiração da cultura (ETc), portanto, não ocorrem perdas de produtividade. Entretanto, em momentos que a ETr é menor do que a ETc as perdas de produtividades são proporcionais à esse déficit hídrico.

Dessa forma, com os dados de produtividade potencial (PP) obtidos, os coeficientes de resposta da cultura ao déficit hídrico (Ky), que varia em função dos estádios fenológicos da planta, e o déficit hídrico relativo, proveniente do balanço hídrico da cultura, foi possível estimar os valores da produtividade atingível (PA). A Tabela 8 apresenta os valores de Ky utilizados durante os diferentes estádios fenológicos da cultura da cana-de-açúcar, segundo Doorenbos e Kassam (1994).

$$PA = PP \prod_{i=1}^m \left[1 - Ky_i \left(1 - \frac{ETr_i}{ETc_i} \right) \right] \quad (19)$$

em que: i é o índice que varia de 1 a m ; m representa os estádios fenológicos da cultura; e Ky é o coeficiente de resposta da cultura ao déficit hídrico.

Tabela 8 – Coeficientes de resposta da cultura ao déficit hídrico (Ky) da cana-de-açúcar para cada estágio fenológico

Estádio fenológico	Coeficientes de resposta ao déficit hídrico (Ky)
Plantio até 25% do fechamento	0,75
25 a 50% do fechamento	0,75
50 a 75% do fechamento	0,50
75 a 100% do fechamento	0,50
Desenvolvimento máximo	0,50
Início da maturação	0,50
Maturação	0,10

Conhecendo-se os valores da produtividade potencial e atingível, foi possível determinar a quebra de produtividade (Q, em %) de acordo com a equação abaixo:

$$Q(\%) = \left(1 - \frac{PA}{PP}\right) \times 100 \quad (20)$$

3.5 Parametrização e calibração do modelo de estimativa das produtividades potencial e atingível

Com os dados de produtividade atingível (PA), calculados pelo modelo da FAO, foram realizados os primeiros processos de calibração do modelo, mediante a manipulação dos valores dos coeficientes de resposta ao déficit hídrico (Ky), com o intuito de obter o melhor ajuste entre os dados observados e os dados estimados pelo modelo.

Através dos novos valores de Ky, para cada estágio fenológico, foi dado início ao processo de verificação da sensibilidade dos genótipos de cana-de-açúcar ao déficit hídrico. Essa verificação foi realizada mediante a manipulação dos novos valores de Ky com o intuito de obter o melhor ajuste entre as produtividades observadas pelos genótipos e as obtidas pelo modelo. O grau de tolerância desses genótipos ao déficit hídrico foi mensurado pelos valores obtidos de Ky após o ajuste realizado.

O processo de calibração dos valores de Ky objetivou o menor valor do erro médio absoluto (EMA) entre os dados observados e os estimados de produtividade atingível através de um processo iterativo. Esse processo foi realizado em uma planilha eletrônica do Excel programada, onde outros índices estatísticos foram calculados como: coeficiente de determinação (R^2), o qual representa o grau de dependência da variável predita pela variável preditora, ou seja, indica a precisão do modelo; coeficiente “d” de Willmott (1985), o qual representa a distância relativa dos valores estimados da reta 1:1, ou seja, indica a acurácia do modelo e é calculado de acordo com a eq. (21); coeficiente de concordância “c”, de Camargo e Sentelhas (1997), o qual representa o índice de concordância ou desempenho do modelo e é calculado por meio da eq.(22); o erro médio absoluto (EMA) e o viés médio (EM) calculado de acordo com as eq. (23) e (24) respectivamente.

$$d = 1 - \frac{\sum (PA_{est} - PA_{obs})^2}{\sum (|PA_{est} - \overline{PA}_{obs}| + |PA_{obs} - \overline{PA}_{obs}|)} \quad (21)$$

em que: PA_{est} é a produtividade atingível estimada pelo modelo da FAO, expressa em $kg\ ha^{-1}$; PA_{obs} é a produtividade observada expressa em $kg\ ha^{-1}$.

$$C = r \times d \quad (22)$$

em que: r é o coeficiente de correlação de Pearson; e d é o coeficiente de Willmott.

Os critérios de interpretação dos dados obtidos, para o coeficiente de concordância (c) de Camargo e Sentelhas (1997), pode ser observado na Tabela 9.

Tabela 9 – Critérios de interpretação do desempenho dos métodos de estimativa, pelo índice “ c ” (Camargo e Sentelhas, 1997)

Valor de “ c ”	Desempenho
> 0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,50	Mau
$\leq 0,40$	Péssimo

$$EMA = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n |PA_{esti} - PA_{obsi}| \quad (23)$$

$$EM = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n PA_{esti} - PA_{obsi} \quad (23)$$

em que: i é o índice que varia de 1 à n ; n é o número de observações.

Apesar da raiz do erro quadrático médio (RSME, sigla em inglês) ser uma medida amplamente utilizada para a verificação do desempenho de modelos, Willmott e Matsuura (2005) afirmam que o uso do erro médio absoluto (EMA) é a melhor indicativa para a determinação da sua *performance*. Isso se deve ao fato do RSME variar, além da magnitude do erro médio absoluto, também em função da distribuição dos erros e da raiz quadrada do número de erros.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Parametrização e calibração do Modelo FAO

Com os dados de produtividade atingível (PA) estimados para cada ensaio, mediante a aplicação do Método da Zona Agroecológica (Modelo FAO), foi verificado a relação desses com os dados médios de produtividade alcançados pelos ensaios da rede experimental do Programa Cana/IAC.

Inicialmente foram considerados todos os experimentos, isto é, todos os ensaios de cana-planta e cana-soca, e todos as épocas de colheita (outono, inverno e primavera).

Na Figura 5A, encontra-se a relação entre os dados de produtividade observados e estimados para cada ensaio. Observamos que o modelo apresentou um coeficiente de determinação (R^2) de 0,6532. Entretanto, sabemos que apenas o coeficiente de determinação (R^2) não é suficiente para determinar a *performance* de um modelo de estimativa, pois avalia apenas a precisão (dispersão dos pontos) em relação à uma reta tendência. Sendo assim, foram calculados os coeficientes de correlação de Pearson (r), que avalia a associação entre essas variáveis; o coeficiente de Willmott (d), que avalia a exatidão dos dados estimados (dispersão dos pontos em relação à reta 1:1); e o coeficiente de concordância (c), que avalia a precisão e exatidão dos dados estimados, visto que agrega os valores de “ r ” e “ d ” em seu cálculo. Nesse caso, foram obtidos os seguintes valores: 0,81; 0,82 e 0,66 para o coeficiente de correlação, índice de Willmott e coeficiente de concordância respectivamente.

Segundo Camargo e Sentelhas (1997), o valor de 0,66 obtido para o índice de concordância, garante uma boa estimativa do modelo da FAO para a estimativa da produtividade observada (atingível) no campo.

Andrioli e Sentelhas (2009) estudaram a sensibilidade de genótipos de milho ao déficit hídrico mediante o uso do modelo da FAO. Nesse estudo os autores, ao estimar a produtividade real da cultura, obtiveram valores de 0,58; 0,82 e 0,49 para os coeficientes de concordância, índice de Willmott e coeficiente de determinação respectivamente.

Figura 5 – Relação entre os dados observados de produtividade (PA_{obs}) e os dados estimados de produtividade atingível pelo modelo da FAO (PA_{est}), considerando os 79 ensaios analisados: A) Ky originais; B) Ky ajustados

Entretanto, observamos que os valores de Ky apresentados por Doorenbos e Kassam (1994) são maiores nas fases iniciais do desenvolvimento da cultura, ou seja, nos estádio I e II, que correspondem ao estádio do plantio até 50% do fechamento das entrelinhas. Isso indicaria que são nesses momentos que a cultura da cana-de-açúcar apresentaria maior sensibilidade ao déficit hídrico quando comparado com os demais estádios fenológicos.

Essa informação contradiz os resultados de Singh e Rao (1987), Rosenfeld (1989), Ramesh (2000) e Inman-Bamber e Smith (2005), que relatam que o período de maior demanda da cultura da cana-de-açúcar à água compreende entre a fase de perfilhamento e, principalmente, a fase de alongação dos colmos. A ocorrência do

estresse hídrico nesses períodos podem causar sérios prejuízos na produção de fitomassa e no rendimento de sacarose.

Observando isso, mesmo o modelo tendo apresentado bons resultados para a estimativa da produtividade observada ($c = 0,66$; $d = 0,82$), foi realizado a calibração (ajuste) dos valores de K_y , objetivando encontrar o menor erro médio absoluto (EMA) (Figura 5B). Na Tabela 10 encontram-se os coeficientes (R^2 , r , d , c , EMA, EM), para o modelo da FAO, com o uso dos valores originais de K_y (sem ajuste) e com os valores ajustados para a estimativa da produtividade atingível.

Além do ganho em precisão ($R^2 = 0,7055$), exatidão ($d = 0,89$) e *performance* ($c = 0,75$), após o ajuste, observamos uma redução significativa do EMA, passando de $23,0 \text{ t.ha}^{-1}$ com os valores originais de K_y para $16,2 \text{ t.ha}^{-1}$ com os valores ajustados. Também pode-se verificar que o modelo com os valores originais de K_y apresentou uma tendência de subestimativa de $-14,1 \text{ t.ha}^{-1}$, enquanto que o modelo com os valores ajustados de K_y apresentou uma superestimativa de $0,7 \text{ t.ha}^{-1}$.

Tabela 10 – Comparação entre os coeficientes estatísticos obtidos para o Modelo da FAO com os valores originais de K_y (Doorenbos e Kassam, 1994) e com os valores ajustados de K_y

Modelos	Coeficientes					
	R^2	r	d	c	EMA	EM
Sem Ajuste	0,6532	0,81	0,82	0,66	23,0	-14,1
Com Ajuste	0,7055	0,84	0,89	0,75	16,2	0,7

Considerando os novos valores de K_y , para cada estágio fenológico, obtido após a calibração do modelo da FAO, observa-se que os valores são condizentes com o que a literatura afirma (Ramesh, 2000; Singh e Rao, 1987; Inman-Bamber e Smith, 2005), ou seja, que o período de maior sensibilidade ao estresse hídrico é o período de crescimento máximo da cultura. Esse fato pode ser evidenciado pelo valor do coeficiente de resposta ao déficit hídrico (K_y) encontrado nesse estágio, ser de maior magnitude quando comparado com os demais (Tabela 11).

Fauconnier e Bassereau (1975) afirmam que nos primeiros meses de desenvolvimento, a demanda hídrica da cana-de-açúcar é relativamente baixa, entretanto no estágio em que a planta apresenta máximo crescimento, as quantidades de água exigidas são maiores.

Tabela 11 – Valores dos coeficientes de resposta ao déficit hídrico (K_y), para cada estágio fenológico, obtido após a calibração do modelo da FAO

Estádio Fenológico	Coeficientes de resposta ao déficit hídrico (K_y)	
	(Doorenbos e Kassam, 1994)	Ajustado
Plantio até 25% do fechamento	0,75	0,10
25 a 50% do fechamento	0,75	0,41
50 a 75% do fechamento	0,50	0,47
75 a 100% do fechamento	0,50	0,26
Desenvolvimento máximo	0,50	0,72
Início da maturação	0,50	0,49
Maturação	0,10	0,22

Andrioli et al. (2006), ao realizar a calibração do modelo da FAO para a cultura do milho safrinha, também observaram alterações nos valores de K_y . Nesse estudo, os autores verificaram a alteração dos valores de K_y para os estádios fenológicos da floração e da frutificação, que passaram respectivamente de 1,5 e 0,5 (valores originais do modelo) para 1,2 e 0,4.

4.2 Calibração do Modelo FAO para os ciclos de produção (planta e soca)

Com o objetivo de verificarmos a diferença entre as estimativas de produtividade para os diferentes ciclos de produção, foi analisada a relação entre as produtividades estimadas pelo modelo FAO e as observadas nos ensaios do Programa Cana/IAC, para cada ciclo em questão.

Na Figura 6 encontram-se os resultados obtidos para o ciclo de cana-planta e cana soca. Os valores encontrados de coeficiente de determinação foram 0,3326 e 0,1051 para o ciclo de cana-planta e cana-soca, respectivamente. Esses valores são considerados muito baixos, o que indica uma baixa precisão do modelo.

Outro ponto importante é o erro médio para o ciclo da cana-soca, mostrando que o modelo subestima a produtividade observada em $29,4 \text{ t.ha}^{-1}$ para esse ciclo.

Além disso, observa-se que os valores do coeficiente de concordância foram 0,42 para cana-planta e 0,15 para cana-soca, o que mostra um desempenho péssimo para essas condições.

Figura 6 – Relação entre os dados observados de produtividade (PA_{obs}) e os dados estimados de produtividade atingível pelo modelo da FAO (PA_{est}), utilizando os valores originais de Ky : A) ensaios de cana-planta; B) ensaios de cana-soca

Objetivando-se melhorar as estimativas da produtividade, para cada ciclo de produção, e verificar os valores dos coeficientes de resposta ao déficit hídrico (Ky), considerando os diferentes estádios fenológicos, foi realizado a calibração (ajuste) dos valores de Ky , mediante a mesma metodologia empregada anteriormente (Tabela 12).

Tabela 12 – Valores dos coeficientes de resposta ao déficit hídrico (Ky) ajustados para cada estágio fenológico obtido após a calibração do modelo da FAO, considerando os diferentes ciclos de produção (cana-planta e cana-soca)

Estádio Fenológico	Coeficientes de resposta ao déficit hídrico (Ky)		
	(Doorenbos e Kassam, 1994)	Planta	Soca
Plantio até 25% do fechamento	0,75	0,10	0,55
25 a 50% do fechamento	0,75	0,28	0,13
50 a 75% do fechamento	0,50	0,45	0,46
75 a 100% do fechamento	0,50	0,75	0,10
Desenvolvimento máximo	0,50	1,50	0,94
Início da maturação	0,50	0,33	0,27
Maturação	0,10	0,17	0,11

Foi verificado que, mesmo ocorrendo uma melhora no desempenho do modelo, os valores dos coeficientes de determinação continuaram baixos, sendo 0,383 e 0,3389 para cana-planta e cana-soca respectivamente. Apesar da redução

dos valores do erro médio absoluto e do erro médio (magnitude), os coeficientes de concordância permaneceram baixos para cana-planta (0,47) e para cana-soca (0,44), o que ainda garante um desempenho péssimo do modelo para essas situações (Figura 7).

Esse resultado era esperado, principalmente para o ciclo de cana-soca, pois separando os ensaios dessa maneira, estamos agrupando três épocas de colheita com grandes diferenças em relação ao período de crescimento e desenvolvimento da cultura. Câmara (1993) e Castro (1999) relatam que o período em que as condições climáticas são favoráveis para o desenvolvimento dos canaviais, dependendo da época de colheita, ocorre em estádio fenológicos diferentes. Para os canaviais colhidos no outono, o período favorável ocorre quando a planta apresenta máximo IAF e taxa de acúmulo de matéria seca, enquanto que para os canaviais colhidos na primavera, esse período ocorre durante a colheita.

Observando novamente para a Figura 4, verifica-se que os ciclos de crescimento, isto é, os períodos de desenvolvimento da cultura, são muito diferentes, principalmente com o momento que inicia o período chuvoso. Considerando a colheita de outono, o início do período chuvoso ocorre com 150 a 180 dias após o corte (DAC). Já para a colheita de primavera, o período chuvoso ocorre concomitantemente com o início do ciclo de crescimento. Esse fato impacta diretamente no crescimento da cultura e consequentemente nos valores de K_y para cada estádio.

Figura 7 – Relação entre os dados observados de produtividade (PA_{obs}) e os dados estimados de produtividade atingível pelo modelo da FAO (PA_{est}), utilizando os valores ajustados de K_y : A) ensaios de cana-planta; B) ensaios de cana-soca

4.3 Calibração do Modelo FAO para as épocas de colheita (outono, inverno e primavera)

Sabendo das diferenças que ocorrem entre o crescimento e desenvolvimento dos canaviais para cada época de colheita (outono, inverno e primavera) da cana-de-açúcar, foi analisada a relação entre as produtividades estimadas pelo modelo FAO e as observadas nos ensaios do Programa Cana/IAC, considerando cada época em questão.

Foram observados os coeficientes de determinação de 0,7128; 0,6113; e 0,6635 para as épocas de colheita de outono, inverno e primavera, respectivamente (Figura 8).

Considerando os valores dos coeficientes de concordância, verifica-se que apenas para a época de colheita de inverno (0,61) o modelo foi considerado com desempenho mediano. Para as épocas de colheita de outono e primavera, o modelo apresentou bom desempenho com valores de 0,70 e 0,71, respectivamente, o que indica uma boa precisão e exatidão dos dados estimados.

Observa-se que para as épocas de colheita de outono e de inverno foram encontrados os maiores valores de erro médio absoluto, sendo 26,4 t.ha⁻¹ e 27,8 t.ha⁻¹, respectivamente. Considerando o erro médio, o modelo apresentou uma tendência à subestimativa para as três épocas de colheita, com valores de -14,3 t.ha⁻¹ (outono), -21,9 t.ha⁻¹ (inverno) e -7,2 t.ha⁻¹ (primavera).

Novamente, com o objetivo de melhorar as estimativas de produtividade, para cada época de colheita, e verificar os valores dos coeficientes de resposta ao déficit hídrico (Ky) para cada estágio fenológico, foi realizado a calibração (ajuste) dos valores de Ky, mediante a mesma metodologia empregada anteriormente (Tabela 13).

(A)

(B)

(C)

Figura 8 – Relação entre os dados observados de produtividade (PA_{obs}) e os dados estimados de produtividade atingível pelo modelo da FAO (PA_{est}), utilizando os valores originais de K_y : A) colheita de outono; B) colheita de inverno; C) colheita de primavera

Quando comparado com os valores originais do modelo, observa-se que, com o ajuste dos valores de K_y , para todas as épocas de colheita, houve uma alteração no estágio de maior sensibilidade ao déficit hídrico. Com os ajustes mencionados, o estágio de maior sensibilidade ao estresse hídrico foi o de desenvolvimento máximo

da cultura, corroborando com os trabalhos de Sigh e Rao (1987), Rosenfeld (1989), Ramesh (2000) e Inman-Bamber e Smith (2005).

Tabela 13 – Valores dos coeficientes de resposta ao déficit hídrico (Ky), ajustados para cada estágio fenológico, obtido após a calibração do modelo da FAO, considerando as diferentes épocas de colheita

Estádio Fenológico	Coeficientes de resposta ao déficit hídrico (Ky)			
	(Doorenbos e Kassam, 1994)	Outono	Inverno	Primavera
Plantio até 25% do fechamento	0,75	0,10	0,10	0,40
25 a 50% do fechamento	0,75	0,35	0,10	0,36
50 a 75% do fechamento	0,50	0,45	0,29	0,67
75 a 100% do fechamento	0,50	0,30	0,15	0,42
Desenvolvimento máximo	0,50	0,81	1,50	0,81
Início da maturação	0,50	0,82	0,50	0,35
Maturação	0,10	0,10	0,21	0,28

Apesar do estágio fenológico de desenvolvimento máximo da cultura, apresentar os maiores valores de Ky, os mesmos foram diferentes quanto a magnitude, sendo 0,81; 1,50 e 0,81 para a colheita de outono, inverno e primavera, respectivamente. Foi observado que os valores de Ky dos estádios iniciais (do plantio até 50% de fechamento), para a época de colheita de primavera, são maiores quando comparados com as demais épocas. Isso se deve ao fato de que a cana-de-açúcar colhida na primavera inicia o seu período de crescimento juntamente com o início das chuvas. Além disso, o canavial colhido na primavera necessita formar sua produção em um menor período do que àquele colhido no outono. Esse fato se deve ao estágio em que as plantas chegam no período favorável de crescimento (outubro a março), no qual o canavial colhido no outono já apresenta uma área foliar formada e estabelecida pronta para realizar fotossíntese, enquanto que o canavial colhido na primavera precisa brotar e se estabelecer.

Verifica-se na Figura 9 um ganho no desempenho do modelo, com aumento de 12,8%, 14,7% e 12,7%, para as colheitas de outono, inverno e primavera, respectivamente. Os coeficientes de concordância para a colheita de outono, inverno e primavera foram: 0,79; 0,70 e 0,80, respectivamente.

(A)

(B)

(C)

Figura 9 – Relação entre os dados observados de produtividade (PA_{obs}) e os dados estimados de produtividade atingível pelo modelo da FAO (PA_{est}), utilizando os valores ajustados de Ky : A) colheita de outono; B) colheita de inverno; C) colheita de primavera

Na Tabela 14 estão compilados todos os índices que avaliam a *performance* dos modelos com e sem o ajuste dos valores de Ky para cada época de colheita.

Além dos valores obtidos para os coeficientes de concordância, observa-se que, para todos os casos, os modelos estão mais precisos (maiores valores de R^2) e mais exatos (maiores valores de d). Outro ponto importante observado, foi a redução

significativa do erro médio absoluto para todos os casos, saindo de 26,4; 27,8; e 13,9 t.ha⁻¹ para 16,0; 11,9; e 9,9 t.ha⁻¹ para as épocas de colheita de outono, inverno e primavera, respectivamente.

Quanto ao erro médio, houve uma redução significativa na magnitude dos valores, apresentando uma superestimativa de 1,8 t.ha⁻¹ para a época de outono, e uma subestimativa de -1,1 e -2,7 t.ha⁻¹ para as épocas de inverno e primavera.

Tabela 14 – Comparação entre os coeficientes obtidos para o modelo de FAO com e sem o ajuste dos valores de K_y para cada época de colheita

Época	Valores K_y	R^2	r	d	c	EMA	EM
Outono	Sem ajuste	0,7128	0,84	0,83	0,70	26,4	-14,3
	Com ajuste	0,7595	0,87	0,91	0,79	16,0	1,8
Inverno	Sem ajuste	0,6113	0,78	0,78	0,61	27,8	-21,9
	Com ajuste	0,622	0,79	0,88	0,70	11,9	-1,1
Primavera	Sem ajuste	0,6635	0,81	0,87	0,71	13,9	-7,2
	Com ajuste	0,7728	0,88	0,91	0,80	9,9	-2,7

4.4 Avaliação da sensibilidade dos genótipos de cana-de-açúcar ao déficit hídrico

Após a calibração do Modelo da FAO, foi analisada a relação entre os dados observados de produtividade, para cada genótipo, com os dados estimados pelo modelo. Para a estimativa da sensibilidade desses genótipos ao déficit hídrico, foi realizada a manipulação dos valores de K_y , a fim de se obter o menor erro médio absoluto. Assim, ao determinar os valores de K_y para cada estágio fenológico, pode-se, através da magnitude desses valores, identificar os genótipos que apresentam maior tolerância a esse tipo de estresse. Para isso, foram considerados todos os ensaios conjuntamente, visto que o modelo da FAO apresentou bom desempenho para essas condições.

Na Figura 10 encontram-se, os gráficos que correlacionam os dados observados de produtividade com os dados estimados de produtividade pelo modelo da FAO, após o ajuste dos valores de K_y para cada genótipo.

Considerando os valores obtidos para os coeficientes de determinação, observa-se que, para todos os casos, foram encontrados valores acima de 0,50, com exceção do clone IACSP982030 ($R^2 = 0,332$), o que evidencia uma menor precisão

da estimativa para esse genótipo. Para os clones IACSP992121 e IACSP994008 foram obtidos os maiores valores de R^2 , sendo 0,7217 e 0,7053 respectivamente. Entretanto, como foi mencionado anteriormente, os valores do coeficiente de determinação não são suficientes para determinar o desempenho do modelo. Visto isso, foram calculados os demais parâmetros estatísticos (r , d , c , EMA e EM), a fim de verificar o desempenho do modelo em estimar a produtividade para cada um dos genótipos avaliados.

IACSP974039

IACSP974048

IACSP982030

IACSP983020

Figura 10 – Relações entre as produtividades observadas e as estimadas pelo modelo FAO para cada genótipo avaliado (continua)

IACSP983021

IACSP991305

IACSP991308

IACSP991352

IACSP991418

IACSP991419

Figura 10 – Relações entre as produtividades observadas e as estimadas pelo modelo FAO para cada genótipo avaliado (continuação)

IACSP992110

IACSP992121

IACSP994007

IACSP994008

IACSP994010

IACSP994011

Figura 10 – Relações entre as produtividades observadas e as estimadas pelo modelo FAO para cada genótipo avaliado (continuação)

Figura 10 – Relações entre as produtividades observadas e as estimadas pelo modelo FAO para cada genótipo avaliado (conclusão)

Observa-se, na Tabela 15, que os menores erros médios (EM) foram encontrados para os clones IACSP991352 e IACSP991419, sendo ambos os valores iguais a 0,2 t.ha⁻¹. Considerando o erro médio absoluto, observa-se que o clone IACSP983020 apresentou o maior valor (24,7 t.ha⁻¹), indicando uma maior variabilidade entre os dados estimados e observados para esse material. Também para esse genótipo, o modelo da FAO apresentou o pior desempenho na estimativa da produtividade atingível, obtendo valores de 0,58; 0,70 e 0,40 para os coeficientes de correlação, índice de Willmott e coeficiente de concordância, respectivamente. Considerando apenas esse genótipo, o modelo da FAO apresentou um desempenho péssimo de acordo com Camargo e Sentelhas (1997).

Para os clones IACSP994039, IACSP982030, IACSP983021, IACSP991305, IACSP991308, IACSP991352, IACSP991418, IACSP991419, IACSP994007, IACSP994011, IACSP994013 e para a variedade RB867515, o modelo da FAO apresentou uma superestimativa dos valores de produtividade, isto é, apresentou um erro médio positivo conforme os dados apresentados na Tabela 15. Já para os clones IACSP974048, IACSP983020, IACSP992110, IACSP992121, IACSP994008 e IACSP994010, o modelo da FAO apresentou uma subestimativa dos valores de produtividade (erro médio negativo), conforme os dados apresentados na mesma tabela.

Observa-se que, com exceção do clone IACSP982030, o Método da Zona Agroecológica apresentou valores para o índice de Willmott maiores ou iguais a 0,80, o que evidencia uma boa acurácia da estimatida. Considerando os coeficientes

de concordância, verifica-se que para todos os genótipos, com exceção da IACSP982030, o modelo da FAO apresentou desempenho de mediano a muito bom em estimar os dados de produtividade atingível. Os maiores valores para os coeficientes de concordância foram encontrados para os clones IACSP993020, IACSP991308, IACSP991419 e IACSP992121 com valores 0,75; 0,74; 0,74 e 0,78 respectivamente.

Tabela 15 – Produtividades potencial e atingível estimadas pelo modelo da FAO, produtividade observada e parâmetros estatísticos para a avaliação do desempenho do modelo

Variedade	PP_{est}	PA_{est}	PA_{obs}	EM	EMA	r	d	c	n
IACSP974039	210,3	107,6	102,2	5,4	18,2	0,77	0,85	0,65	77
IACSP974048	227,1	98,8	100,5	-1,6	17,5	0,80	0,89	0,71	79
IACSP982030	211,6	98,9	91,7	7,3	24,7	0,58	0,70	0,40	79
IACSP983020	226,9	97,4	99,1	-1,7	15,8	0,83	0,90	0,75	77
IACSP983021	215,9	100,6	96,8	4,3	19,8	0,73	0,84	0,61	79
IACSP991305	221,4	99,8	98,8	1,0	17,8	0,79	0,87	0,69	77
IACSP991308	221,9	90,6	90,2	0,5	16,8	0,82	0,89	0,74	79
IACSP991352	231,1	92,7	92,5	0,2	20,4	0,75	0,80	0,60	77
IACSP991418	222,9	85,3	82,6	2,7	17,9	0,77	0,85	0,66	77
IACSP991419	222,0	93,4	93,4	0,2	16,1	0,82	0,90	0,74	79
IACSP992110	225,8	98,5	99,1	-0,3	17,7	0,81	0,88	0,71	79
IACSP992121	224,0	98,3	100,0	-1,1	15,3	0,85	0,92	0,78	79
IACSP994007	218,7	100,7	99,4	1,6	17,6	0,79	0,88	0,70	79
IACSP994008	230,4	83,7	84,8	-1,1	18,1	0,77	0,87	0,67	77
IACSP994010	224,0	105,5	107,4	-1,6	20,0	0,75	0,86	0,65	79
IACSP994011	214,5	99,6	96,2	3,3	15,6	0,84	0,90	0,76	77
IACSP994013	223,3	87,6	85,4	2,2	18,3	0,78	0,85	0,66	77
RB867515	219,6	105,5	104,0	1,4	18,0	0,78	0,86	0,67	79

Os valores dos coeficientes de resposta ao déficit hídrico (K_y), para cada estágio fenológico, obtidos mediante o ajuste do modelo da FAO, para cada genótipo, podem ser encontrados na Tabela 16. Com base nesses valores, verifica-se que os clones IACSP994039 e IACSP994010, juntamente com a variedade RB867515, podem ser considerados genótipos com uma maior tolerância ao déficit hídrico, devido os valores de K_y , para esses genótipos, serem relativamente inferiores ao obtido para o modelo ajustado.

Para o clone IACSP994039 foi observada uma redução significativa no valor do coeficiente de resposta ao déficit hídrico (K_y) para o estágio fenológico V (crescimento máximo), sendo igual a 0,37 enquanto que o modelo da FAO ajustado

apresentou um valor igual a 0,72. Considerando todos os genótipos avaliados, pode-se observar que os maiores valores de Ky foram encontrados também para esse estágio fenológico (V), evidenciando uma maior sensibilidade ao déficit hídrico nesse momento. Esses resultados corroboram com os trabalhos de Singh e Rao (1987), Rosenfeld (1989), Ramesh (2000), e Inman-Bamber e Smith (2005), ao afirmar que o estágio de desenvolvimento máximo da cultura é o momento que a planta apresenta maiores possibilidades de perda em função da deficiência hídrica.

Tabela 16 – Coeficiente de resposta ao déficit hídrico (Ky) para cada estágio fenológico, para os genótipos de cana-de-açúcar avaliados

Variedade	Estádios Fenológicos						
	I	II	III	IV	V	VI	VII
Menor tolerância ao deficit hídrico							
IACSP991418	0,15	0,56	0,52	0,20	1,03	0,56	0,22
IACSP994008	0,10	0,73	0,49	0,26	0,85	0,62	0,11
IACSP994013	0,10	0,45	0,49	0,37	0,78	0,54	0,26
Tolerância normal ao deficit hídrico							
IACSP974048	0,10	0,50	0,32	0,32	0,52	0,57	0,18
IACSP982030	0,10	0,23	0,46	0,31	0,61	0,58	0,19
IACSP983020	0,10	0,43	0,38	0,44	0,69	0,51	0,10
IACSP983021	0,10	0,46	0,45	0,29	0,46	0,53	0,16
IACSP991305	0,10	0,52	0,46	0,21	0,64	0,46	0,22
IACSP991308	0,10	0,43	0,53	0,31	0,62	0,59	0,21
IACSP991352	0,10	0,52	0,46	0,34	0,50	0,50	0,32
IACSP991419	0,10	0,47	0,40	0,37	0,57	0,58	0,21
IACSP992110	0,10	0,65	0,37	0,23	0,65	0,53	0,12
IACSP992121	0,10	0,62	0,36	0,34	0,51	0,49	0,19
IACSP994007	0,10	0,49	0,36	0,24	0,56	0,52	0,25
IACSP994011	0,10	0,37	0,37	0,24	0,89	0,49	0,21
Maior tolerância ao deficit hídrico							
IACSP974039	0,10	0,40	0,45	0,23	0,37	0,47	0,22
IACSP994010	0,10	0,20	0,46	0,34	0,62	0,46	0,19
RB867515	0,10	0,32	0,45	0,28	0,52	0,45	0,23

Para os genótipos IACSP991418, IACSP994008 e IACSP994013, apresentaram os maiores valores de Ky para o estágio V, isto é, esses materiais apresentam uma maior sensibilidade ao déficit hídrico nessa etapa de crescimento. Um ponto interessante a destacar é a origem desses genótipos, sendo tais clones selecionados em condições de maior pluviosidade. Esse fato contribui para os resultados do trabalho, pois espera-se que os materiais selecionados em condições

de baixo estresse hídrico apresentem uma maior dependência da água para o seu desenvolvimento e produtividade.

Considerando todos os ensaios (ciclos de cana-planta e cana-soca, e todas as épocas de colheita) observa-se, na Figura 11, que o modelo da FAO apresentou um ótimo desempenho ($c = 0,89$) ao estimar os dados médios de produtividade atingível, para os diferentes genótipos de cana-de-açúcar. Verifica-se também que o erro médio absoluto apresenta baixa magnitude ($2,1 \text{ t.ha}^{-1}$) e que o modelo tem uma leve tendência à subestimar os valores de produtividade ($EM = -1,1 \text{ t.ha}^{-1}$).

Figura 11 – Relação entre as produtividades médias observadas e estimadas pelo Modelo FAO para os 18 genótipos avaliados

Analisando as produtividades médias observadas, considerando todos os ciclos de produção e épocas de colheita, verifica-se que o clone IACSP994010 apresentou a maior produtividade média ($107,4 \text{ t.ha}^{-1}$), seguido da variedade RB867515 ($104,0 \text{ t.ha}^{-1}$) e do clone IACSP994039 ($102,2 \text{ t.ha}^{-1}$). As menores produtividades médias observadas foram para os clones IACSP991418 ($82,6 \text{ t.ha}^{-1}$), IACSP991408 ($84,8 \text{ t.ha}^{-1}$) e IACSP994013 ($85,4 \text{ t.ha}^{-1}$) (Figura 12A).

Para as produtividades potenciais, estimadas pelo Método da Zona Agroecológica, considerando todos os ensaios, foi observado que os maiores valores de rendimento foram encontrados para os clones IACSP991352 ($231,1 \text{ t.ha}^{-1}$), IACSP994008 ($230,4 \text{ t.ha}^{-1}$) e IACSP974048 ($227,1 \text{ t.ha}^{-1}$). Isso implica que esses genótipos, caso não ocorresse déficit hídrico durante o ciclo de desenvolvimento da

planta, seriam os materiais que potencialmente poderiam obter maiores produtividades. Já os clones IACSP994039 (210,3 t.ha⁻¹) e IACSP982030 (211,6 t.ha⁻¹) apresentaram as piores produtividades potenciais (Figura 12B).

Figura 12 – Produtividade em toneladas de colmos por hectare para os genótipos de cana-de-açúcar, considerando todos os ensaios: A) produtividade média observada; B) produtividade média estimada

Apesar do clone IACSP994039 apresentar a menor produtividade potencial, observa-se que o mesmo apresentou a terceira maior produtividade atingível. Considerando os cálculos de quebra de produtividade, para cada genótipo (Figura 13), observa-se que o clone IACSP994039, apresentou a menor quebra de

produtividade em função ao déficit hídrico (51,43%). Esse fato pode ser reafirmado com os valores de K_y obtidos para esse clone em questão, ou seja, devido os menores valores de K_y , pode-se afirmar que o clone IACSP994039 apresenta uma maior tolerância à deficiência hídrica ocasionando uma menor quebra de produtividade quando a mesma ocorre.

Também, verifica-se que o clone IACSP994010 apresentou a segunda menor quebra de produtividade em função do déficit hídrico com valor de 52,03%. Os clones IACSP994008, IACSP991418, IACSP994013 apresentaram as maiores quebras de produtividades com valores de 63,2%, 63,0% e 61,8% respectivamente.

Observando esses dados, pode-se indicar que os clones IACSP994039 e IACSP994010, juntamente com a variedade RB867515, podem ser recomendados para regiões que apresentam maiores déficits hídrico, pois apresentam uma maior tolerância à esse tipo de estresse, o qual pode ser verificado pelo valores do coeficiente de resposta ao déficit hídrico (k_y) e pela menor quebra de produtividade. Entretanto, os clones IACSP994008, IACSP991418 e IACSP994013 devem ser recomendados para regiões que apresentam menor probabilidade de ocorrência de períodos prolongados de déficit hídrico, visto que essa condição pode impactar seriamente em suas produtividades.

Figura 13 – Quebra de produtividade, em porcentagem, estimada para os genótipos de cana-de-açúcar, considerando todos os ensaios

5 CONCLUSÕES

O Método da Zona Agroecológica (Modelo da FAO) pode ser utilizado para a estimativa da produtividade da cana-de-açúcar. Apesar desse modelo não considerar a ocorrência de pragas e a fertilidade do solo, as produtividades estimadas pelo modelo apresentaram uma boa confiabilidade quando comparadas com os dados observados em campo.

Para a utilização do Modelo da FAO, nas condições brasileiras, é necessário realizar os ajustes dos valores dos coeficientes de resposta ao déficit hídrico (K_y), para os diferentes estádios fenológicos da cultura. O estágio fenológico que apresenta maior susceptibilidade ao déficit hídrico, com consequente perda de rendimento, é o estágio de máximo crescimento da cultura, em que as plantas apresentam elevado IAF e taxa de acúmulo de matéria seca.

A utilização do modelo da FAO possibilitou a distinção de genótipos de cana-de-açúcar, em classes, quanto à tolerância à deficiência hídrica. Entretanto, para essa determinação, é necessário um grande número de observações com o intuito de melhorar o universo da análise e da estimativa.

REFERÊNCIAS

- ANDRÉ, R.G.B.; MENDONÇA, J.C.; MARQUES, V.S.; PINHEIRO, F.M.A.; MARQUES, J. Aspectos energéticos do desenvolvimento da cana-de-açúcar. Parte 1: Balanço de radiação e parâmetros derivados. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo. v.25, n.3, p. 375-382, Dec, 2010.
- ANDRIOLI, K.G.; SENTELHAS, P.C.; SOLER, C.M.T.; MARIN, F.R. Calibração do modelo da FAO para simulação da produtividade potencial e real do milho safrinha. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 14, 2006, Florianópolis. **Anais eletrônicos...** Florianópolis, 2006. Disponível em: < <http://www.cbmet.com/cbm-files/14-469e60e9da77466647b6844d2d860f4d.pdf> >. Acesso em: 10 set. 2006.
- ANDRIOLI, K.G.; SENTELHAS, P.C. Brazilian maize genotypes to water deficit estimated through a simple crop yield model. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, n. 7, p. 653-660, July, 2009.
- ALFONSI, R.R.; PEDRO JR., M.J.; BRUNINI, O.; BARBIERI, U. Condições climáticas para a cana-de-açúcar. In: PARANHOS, S.B. **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. p. 42-55.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300p. (FAO: Irrigation and Drainage Paper, 56).
- ARTLIP, T.S.; WISNIEWSKI, M.E. Induction of proteins in response to biotic stresses. In: PESSARAKLI, M. (Ed.) **Handbook of plant and crop physiology**. New York: Marcel Dekker, 2001. p. 657-680.
- ASSAD, E.D.; MARIN, F.R.; EVANGELISTA, S.R.; PILAU, F.P.; FARIAS, J.R.B.; PINTO, H.S.; ZULLO JUNIOR, J. Sistema de previsão de safra de soja para o Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 5, p. 615-625, maio, 2007.
- BARBIERI, V. **Condicionamento climático da produtividade potencial da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*): um modelo matemático-fisiológico de estimativa**. 1993. 140p. Tese (Doutorado em agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 1993.
- BARBIERI, V.; VILLA NOVA N.A. **Climatologia e a cana-de-açúcar**. Araras: PLANALSUCAR – Coordenadoria Regional Sul – COSUL. Climatologia, 1977. p. 1-22.
- BARBIERI, V.; TERUEL, D.A.; SILVA, J.G.; SANTOS, R.M.N. Balanço hídrico de Thornthwaite e Mather modificado para estimativa de deficiência nas culturas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 10, 1997. Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia; ESALQ, 1997. p. 587-589.

BARBIERI, V.; TUON, R.L. **Metodologia para estimativa da produção potencial de algumas culturas**. Piracicaba: ESALQ, Departamento de Física e Meteorologia, 1992. 17p.

BRAY, E.A. Plant responses to water deficit. **Trends in Plant Science**, Kidlington, v. 2, n.2, p. 48-54, Feb., 1997.

CÂMARA, G.M.S Ecofisiologia da cultura da cana-de-açúcar. In: CÂMARA, G.M.S; OLIVEIRA, E.A.M. **Produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: FEALQ, 1993. p. 31-64.

CAMARGO, A.P.; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes modelos de estimativa de evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.5, n.1, p.89-97, 1997.

CAMARGO, M.B.P.; BRUNINI, O.; MIRANDA, M.A.C. Modelo agrometeorológico para estimativa da produtividade para a cultura da soja no Estado de São Paulo, Brasil. **Bragantia**, Campinas, v. 45, n. 2, p. 279-292, 1986.

CASTRO, P.R.C. Maturadores químico em cana-de-açúcar. In: Semana da cana-de-açúcar de Piracicaba, 4., 1999. Piracicaba, **Anais... Saccharum**, v.1, p. 12-16, 1999.

CATTIVELLI, L.; RIZZA, F.; BADECK, F.W.; MAZZUCOTELLI, E. MASTRANGELO, A.M.; FRANCA, E.; MARE, C.; TONDELLI, A.; STANCA, A.M. Drought tolerance improvement in crop plants: An integrated view from breeding to genomics. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.105, p. 1-14, 2008.

CHEAVEGATTI-GIANOTTO, A.; ABREU, H.M.C. de; ARRUDA, P. et al. Sugarcane (*Saccharum X officinarum*): A reference study for the regulation of genetically modified cultivars in Brazil. **Tropical Plant Biology**, Springer, v.4, n.1, p.62-89, 2011.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar, quarto levantamento, abril/2013** – Companhia Nacional de Abastecimento. – Brasília: Conab 2013.

DANIELS, J.; ROACH, B.T. Taxonomy and evolution. In: HEINZ, D.J. (Ed.). **Sugarcane improvement through breeding**. Amsterdam: Elsevier, 1987. p.7-84.

DE WIT, C.T. **Photosynthesis of leaf canopies**. Wageningen: Pudoc, 1965. 57 p. (Agriculture Research Report, 663).

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979. 212p. (FAO – Irrigation and drainage paper, 33).

_____. **Efeitos da água no rendimento das culturas**. Roma: FAO, 1994. 212 p. (Estudos FAO. Irrigação e Drenagem, 33).

DOURADO-NETO, D.; TERUEL, D.A.; REICHARDT, K.; NIELSEN, D.R.; FRIZZONE, J.A.; BACCHI, O.O.S. Principles of crop modeling and simulation: I. Uses of mathematical models in agricultural science. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.55, p. 46-50, 1998.

DUVICK, D.N.; SMITH, J.S.C.; COOPER, M. Long-term selection in a commercial hybrid maize breeding program. **Plant Breeding Reviews**, Hoboken, v.24, pt. 2, p. 109-151, 2004.

FAUCONIER, R.; BASSEREAU, D. **La caña de azúcar**: técnicas agrícolas y producciones tropicales. Barcelona: Blume, 1975. 433p.

GOUVÊA, J.R.F. **Mudanças climáticas e a expectativa de seus impactos na cultura da cana-de-açúcar na região de Piracicaba, SP**. 2008. 98p. Dissertação (Mestrado em Física do Ambiente Agrícola) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

GUIMARÃES, A.C.R. **Caracterização de variedades de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) submetidas a déficit hídrico**. 2011. 66p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2011.

IDE, B.Y.; OLIVEIRA, M.A. de Efeito do clima na produção da cana-de-açúcar. In: SEMINÁRIO DE TECNOLOGIA AGRONÔMICA, 3., 1986. Piracicaba, **Anais...** São Paulo: COPERSUCAR, 1986. p 573-583.

INMAN-BAMBER, N.G. Temperature and seasonal effects on canopy development and light interception of sugarcane. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 36, p. 41-51, 1994.

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

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

JONES, C.A.; KINIRY, J.R. **CERES-MAIZE model**: a simulation model of maize growth and development. Texas: A&M University Press, 1986. 194p.

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**, Cambridge, v. 61, p. 253-271, 1999.

KRAMER, P.J.; BOYER, J.S. **Water relations of plants and soils**. San Diego: Academic Press, 1995. 495 p.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos, SP: RiMa, 2004. 531 p.

LISSON, S.N. The historical and future contribution of crop physiology and modeling research to sugarcane production systems. **Field Crops Research**, Cambridge, v. 92, p. 321-336, 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.

MAGALHÃES, A.C.N. Ecofisiologia da cana-de-açúcar: aspectos do metabolismo do carbono na planta. In: CASTRO, P.R.C; FERREIRA, S.O.; YAMADA, T. (Ed.). **Ecofisiologia da produção agrícola**. Piracicaba: Potafós, 1987. p. 113-118.

MARCHIORI, L.F.S. **Influência da época de plantio e corte na produtividade de cana-de-açúcar**. 2004. 273 p. – Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2004.

MATSUOKA, S. GARCIA, A.A.F.; ARIZONO, H. Melhoramento da cana-de-açúcar. In: BORÉM, A. (Ed.) **Melhoramento de espécies cultivadas**. Viçosa, MG: UFV, 2005. p.225-274.

McCREE, K.J.; FERNÁNDEZ, C.J. Simulation model for studying physiological water stress responses of whole plants. **Crop Science**, Madison, v.29, p.353-360, 1989.

MONTEIRO, L.A. **Modelagem agrometeorológica como base para a definição de ambientes de produção da cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo**. 2012. 116p. Dissertação (Mestrado em Física do Ambiente Agrícola) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

MONTEITH, J.L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. **Journal of Transactions of the Royal Society of London. Serie B, Biological Sciences**, London, v.281, p. 277-294, 1977.

MOORE, P.H.; NUSS, K.J. Flowering and flower synchronization. In: HEINZ, D.J. (Org.). **Sugarcane improvement through breeding**. Amsterdam: Elsevier, 1987. cap. 7, p. 273-311.

MORISON, J.I.L.; BAKER, N.R.; MULLINEAUX, P.M.; DAVIES, W.J. Improving water use in crop production. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Serie B, Biological Sciences**, London, v.363, p.639-658, 2008.

OLIVEIRA, R.A.; SANTOS, R.S.; RIBEIRO, A.; ZOLNIER, S.; BARBOSA, H.P. Estimativa da produtividade da cana-de-açúcar para as principais regiões produtoras de Minas Gerais usando-se o método ZAE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, p. 549-557, 2012.

OMETTO, J.C. **Parâmetros meteorológicos e a cultura da cana-de-açúcar**. Piracicaba, 1980. 17p. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

ORTOLANI, A.A.; CAMARGO, M.B.P. Influência dos fatores climáticos na produção. In: CASTRO, P.R.C; FERREIRA, S.O.; YAMADA, T. **Ecofisiologia da produção agrícola**. Piracicaba: Instituto da Potassa e Fosfato, 1987. p.71-100.

PEDROZO, C.A. **Eficiência da seleção em fases iniciais no melhoramento da cana-de-açúcar**. 2006. 109 p. Mestrado (Dissertação em Genética e Melhoramento de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

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, A.R.; ANGELOCCI, L.R.; SENTELHAS, P.C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Ed. Agropecuária, 2002. 478 p.

PIMENTEL, C. **A relação da planta com a água**. Seropédica: Edur, 2004. 191p.

PRADO, H. **Pedologia fácil: aplicações em solos tropicais**. Piracicaba: H. do Prado, 2013. 284 p.

SCARPARI, M.S. **Modelos para a previsão da produtividade da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) através de parâmetros climáticos**. 2002. 79 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

SCARPARI, M.S.; BEAUCLAIR, E.G.F. Physiological model to estimate the maturity of sugarcane. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 66, p. 662-628, 2009.

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

RAMESH, P. Effect of different levels of drought during the formative phase on growth parameters and its relationship with dry matter accumulation in sugarcane, **Journal of Agronomy and Crop Science**, Berlim, v.185, p.83-89, 2000.

ROBERTSON, G.W. **Guidelines on crop-weather models**. Geneva: World Meteorological Organization, 1983. 115 p. (World Climate Application Programme, 50).

RODRIGUES, J.D. **Fisiologia da cana-de-açúcar**. Botucatu: UNESP, 1995. 100p. (Apostila).

ROLIM, G.S.; SENTELHAS, P.C.; BARBIERI, V. Planilha no ambiente Excel para os cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.6, p.133-137, 1998.

ROSENFELD, U. **Período crítico de deficiência hídrica para a cana planta em cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*)** 1989. 89p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1989.

SANTOS, R.F.; CARLESSO, R. Déficit hídrico e os processos morfológicos e fisiológicos das plantas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.2, n.3, p.287-294, 1998.

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. de (Org.). **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: ESALQ, 2006. cap. 2, p. 19-36.

SINGH, S.; RAO, P.N.G. Varietal differences in growth characteristics in sugarcane. **The Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v.108, p.245-247, 1987.

SMIT, M.A.; SINGELS, A. The response of sugarcane canopy development to water stress. **Field Crops Research**, Cambridge, v. 98, p. 91-97, 2006.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Tradução de L.R. Santarém. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719 p.

TERAMOTO, E.R. **Avaliação e aplicação de modelos de estimativa de produção de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) baseadas em parâmetros do solo e do clima**. 2003. 86 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

THOMPSON, L.M. Weather and technology in the production of soybeans in the Central United States. **Agronomy Journal**, Madison, v. 62, n. 2, p. 232-236, 1970.

THOMPSON, G.D. Water use by sugarcane. **South African Sugar Cane Journal**. Durban, v. 60, n. 11, p. 593-635, 1976.

THORNTHWAITE, C.W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, New York, v. 38, p. 55-94, 1948.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. The water balance. Publications in **Climatology**. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 1955. 104 p.

WALDRON, J.C.; GLASZIOU, K.T.; BULL, T.A. The physiology of sugar cane. IX. Factors affecting photosynthesis and sugar storage. **Australian Journal of Biological Sciences**, Melbourne, v.20, n.6, p. 1043-1052, 1967.

WILLMOTT, C.J.; ACKLESON, S.G.; DAVIS, R.E.; FEDDEMA, J.J.; KLINK, K.M.; LEGATES, D.R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C.M. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 90, p.8995-9005, 1985.

WILLMOTT, C.J.; MATSUURA, K. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. **Climate Research**, Oldendorf, v.30, p.79-82, 2005.