

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**MODELOS AGROMETEOROLÓGICOS ESTATÍSTICOS DE
PREVISÃO DE PRODUTIVIDADE E QUALIDADE PARA
CANA-DE-AÇÚCAR**

Marcos Antonio Marcari

Engenheiro Agrônomo

2015

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**MODELOS AGROMETEOROLÓGICOS ESTATÍSTICOS DE
PREVISÃO DE PRODUTIVIDADE E QUALIDADE PARA
CANA-DE-AÇÚCAR**

Marcos Antonio Marcari

Orientador: Prof. Dr. Glauco de Souza Rolim

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Produção Vegetal).

2015

Marcari, Marcos Antonio
M313m Modelos agrometeorológicos estatísticos de previsão de
produtividade e qualidade para cana-de açúcar. -- Jaboticabal, 2015
xiii, 34 p. : il. ; 28 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2015
Orientador: Glauco de Souza Rolim
Banca examinadora: Maurício dos Santos Simões, Alexandre
Barcellos Dalri
Bibliografia

1. Deficiência hídrica. 2. Balanço hídrico. 3. Risco climático. I.
Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 551.581.1:633.61

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação –
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de Jaboticabal.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

CAMPUS DE JABOTICABAL

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS DE JABOTICABAL

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: MODELOS AGROMETEOROLÓGICOS ESTATÍSTICOS DE PREVISÃO DE
PRODUTIVIDADE E QUALIDADE PARA CANA-DE-AÇÚCAR

AUTOR: MARCOS ANTONIO MARCARI

ORIENTADOR: Prof. Dr. GLAUCO DE SOUZA ROLIM

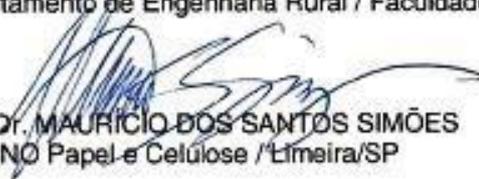
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE EM AGRONOMIA
(PRODUÇÃO VEGETAL), pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. GLAUCO DE SOUZA ROLIM

Departamento de Ciências Exatas / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal


Prof. Dr. ALEXANDRE BARCELLOS DALRI

Departamento de Engenharia Rural / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal


Prof. Dr. MAURÍCIO DOS SANTOS SIMÕES
SUZANO Papel e Celulose / Limeira/SP

Data da realização: 12 de junho de 2015.

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

MARCOS ANTONIO MARCARI – nascido em 04 de dezembro de 1967 na cidade de Pradópolis - SP, filho de Vicente Marcari e Benvinda Teixeira Marcari, é Engenheiro Agrônomo formado pela Faculdade Moura Lacerda, Ribeirão Preto, em 2009. Realizou seu estágio obrigatório de conclusão de curso na Usina São Martinho- SP, trabalhando com perdas de água e de solo na renovação dos canaviais. Desde janeiro de 1987, trabalha com a cultura da cana-de-açúcar. Em março de 2013 iniciou curso de Mestrado em Agronomia (Produção Vegetal) na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, UNESP, Jaboticabal.

“Há homens que lutam um dia, e são bons.
Há outros que lutam um ano, e são melhores.
Há os que lutam muitos anos, e são muito bons.
Mas, há os que lutam toda a vida.
Estes são os imprescindíveis”.

Berthold Brecht

DEDICATÓRIA

Aos meus queridos pais Vicente (*in memorian*) e Benvinda, pela dedicação e apoio ao longo de minha vida.

À minha amada esposa Marcia pelo contínuo estímulo à realização dos meus sonhos e meus preciosos filhos Guilherme e Gabriel, tão importantes em todos os momentos de minha vida.

À todas as pessoas especiais que dividiram seu tempo comigo, me acompanharam e fizeram parte dessa realização.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por iluminar minha vida e me guiar por todos os caminhos que já trilhei;

Ao Prof. Dr. Glauco de Souza Rolim pelo incentivo, orientação, dedicação, ensinamentos, compreensão, confiança e amizade;

Ao Dr. Maurício dos Santos Simões pelo incentivo, conselhos, amizade, a minha eterna gratidão;

À Universidade Estadual Paulista, Câmpus de Jaboticabal, e em especial ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, pela oportunidade da realização do Curso de Mestrado;

Aos membros da banca examinadora no Exame de Qualificação e na Defesa da Dissertação, Prof. Dr. Luiz Fabiano Palaretti, Profa. Dra. Amanda Liz Pacífico Manfrim Perticarrari, Dr. Maximiliano Salles Scarpari, Dr. Maurício dos Santos Simões e Prof. Dr. Alexandre Barcellos Dalri pela valiosa contribuição com suas sugestões;

À todos os colaboradores da São Martinho que de alguma forma fizeram parte desta realização acadêmica, em especial ao Mário Gandini, Luís Gustavo Teixeira, Luiz Alberto Henriques, Carlos Alberto Borba, Diego Furlan, Idinei Della Marta, Pedro Ramos, Richardson Gouveia, Igor, Lidiane, Luma, Rafael, Lucas, Cassiano, Mailson, Eduardo, Edson Lavezzo, João, Marcelo, Vitorino, Luciano, Renato, Rafael Monteiro pelo apoio e amizade durante o curso;

Aos colegas do Departamento de Ciências Exatas: Lucas e Victor pelo apoio, ao longo do trabalho;

Enfim, para aqueles que, de alguma forma, colaboraram direta ou indiretamente para a finalização de mais esta etapa acadêmica, deixo meus sinceros agradecimentos.

Muito Obrigado!

SUMÁRIO

	Página
RESUMO	x
ABSTRACT	xi
LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE TABELAS	xiii
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 A importância do agronegócio da cana-de-açúcar.....	3
2.2 Influências do clima no desenvolvimento e produtividade da cana-de-açúcar... 3	
2.2.1 Temperatura do ar.....	4
2.2.2 Radiação Solar	5
2.2.3 Balanço Hídrico	6
2.2.3.1 Umidade do solo	7
2.3 Importância da previsão de produtividade e de açúcar total recuperável em cana-de-açúcar	8
2.4 Modelagem para o cultivo da cana-de-açúcar	9
2.5 Ambiente de produção.....	11
3 MATERIAL E MÉTODOS	13
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	18
5 CONCLUSÕES	28
5.1 Próximos passos.....	28
5.2 Crítica a metodologia e aos resultados.....	28
6 REFERÊNCIAS	29

MODELOS AGROMETEOROLÓGICOS ESTATÍSTICOS DE PREVISÃO DE PRODUTIVIDADE E QUALIDADE PARA CANA-DE-AÇÚCAR

RESUMO – O clima é o fator importante que influencia a cana-de-açúcar e seu estudo é fundamental para entender as exigências climáticas da safra. A estimativa é feita com dados históricos e representa uma condição atual, já a previsão é a estimativa feita para o futuro, ou seja, com dados disponíveis atuais simular uma condição futura. O presente trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de modelos agro-meteorológicos regionais para fazer a previsão da produtividade em toneladas de cana por hectare (TCH) e qualidade da matéria prima em relação á total de açúcar recuperável (ATR) da cana em uma escala mensal. Foram utilizados dados climatológicos mensais (temperatura do ar, precipitação, deficiência e excesso hídricos, evapotranspiração potencial e real do solo, armazenamento de água no solo, radiação solar global) do ano anterior, para prever TCH e ATR do próximo ano por meio de regressão linear múltipla. A combinação de dados climatológica mensal foi feito buscando um menor erro médio percentual absoluto possível com valor-p inferior a 0,05, e modelos com maior antecipação possível. Dados de 12 anos da região de Jaboticabal, de um grande produtor de cana no Estado de São Paulo, foram utilizados para análise, sendo o período de 2002-2009 utilizados para calibração e 2010-2013 para validação. Observou-se que todos os modelos calibrados foram significativos e precisos, pois os maiores valores de erro médio percentual absoluto (MAPE) foram de 4,06% na previsão do TCH (C) de julho. O modelo calibrado para novembro teve a presença de variável déficit hídrico em todos os ambientes, mostrando a importância dessa variável na cultura. Modelos mensais testadas neste trabalho apresentaram desempenhos significativos em sua previsão. Por exemplo, a previsão do TCH_{MAI} no ambiente AB (MAPE = 1,89% e R adj = 0,90), considerando um valor médio de 90,6 t ha⁻¹ na região, o modelo erra cerca de 1,7 t ha⁻¹. Neste caso, a antecipação para previsão TCH_{MAI} foi de oito meses, porque o último mês usado no modelo foi DEF_{SET}.

Palavras-chave: balanço hídrico, deficiência hídrica, risco climático

STATISTICAL AGRO-METEOROLOGICAL MODELS OF PRODUCTIVITY AND QUALITY FORECAST FOR SUGARCANE

ABSTRACT – The climate is the important factor of influence for sugarcane and its study is fundamental for understanding the climatic requirements of the crop. The estimate is made with historical data and is a current condition, as the forecast is the estimate made for the future, ie, with current available data simulate a future state. The present work aimed developing regional agro-meteorological models to make the yield forecasting of tons of sugarcane per hectare (TCH) and quality in relation to total recoverable sugar (ATR) of sugarcane in a monthly scale. We used monthly climatological data (air temperature, Precipitation, Water Deficiency and Surplus, Potential and Actual evapotranspiration, Soil Water Storage, Solar Global irradiation) of the previously year to forecast TCH and ATR of the next year using multiple linear regression. The combination of monthly climatological data was made searching a small mean absolute percentage error possible with p-value less than 0.05, and models with greater possible anticipation. Data of 12 years of Jaboticabal, a major sugarcane producer in the State of São Paulo, were used for analysis, being the period from 2002 to 2009 used for calibration and from 2010 to 2013 for validation. We observed that all models calibrated were significant and accurate, because the higher values of mean absolute percentage error (MAPE) were of 4.06% in the forecasting of the TCH(C) of July. The model calibrated for November had the presence of water deficit variable in every environment, showing the importance of this variable in the crop. Monthly models tested in this work showed significant performances in their forecasting's. For example, the forecast of the TCH_{MAY} in the AB environment (MAPE = 1.89% and R² adj = 0.90) considering an average value of 90.6 t ha⁻¹ in the region, the model misses about 1.7 t ha⁻¹. In this case the anticipation for forecasting TCH_{MAY} was eight months because the last climatological month used in the model was DEF_{SEP}.

Keywords: water balance, water stress, climate risk

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Fenologia no ano de desenvolvimento (1 ^o ano) e produção (2 ^o ano) para o cultivo canavieiro.....	15
Figura 2. Caracterização climática mensal para a localidade de Jaboticabal-SP, A) temperatura do ar média mensal (mínima, média e máxima) (°C) e a radiação global ($W m^{-2}$); B) precipitação pluviométrica média mensal, armazenamento de água no solo (mm) e C) componentes do balanço hídrico climatológico (excedente e deficiência hídrica, mm).....	19
Figura 3. a) Tonelada de colmo por hectare (TCH) b) Açúcar total recuperável (ATR $Kg t^{-1}$) no período entre maio de 2002 a novembro 2013. As barras verticais indicam valores máximos e mínimos observados no período	20
Figura 4. Quantidade de modelos gerados e testados para cada mês em relação à multicolinearidade para a elaboração dos modelos agrometeorológicos de previsão de qualidade e produtividade de cana de açúcar.....	21
Figura 5. Exemplo de ordenação para a classificação dos modelos segundo os critérios de acurácia (menor MAPE), precisão (maior R^2 ajustado) e confiabilidade (menor p-valor	21
Figura 6. Análise de sensibilidade dos valores médios dos coeficientes angulares dos dez melhores modelos de previsão do a) ATR; b) TCH (ambiente AB); c) TCH (ambiente C) e d) TCH (ambiente DE	22
Figura 7. Dados previstos mensais do TCH em todos os ambientes e ATR com o respectivo intervalo de confiança (95%) no período de 2010 a 2013.....	26
Figura 8. Análise geral da precisão das previsões mensais dos modelos de (ATR) açúcar total recuperável (a) e produtividade (TCH) nos ambientes AB (b), C (c) e DE (d) para a localidade de Jaboticabal-SP	27

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1. Reagrupamento de ambientes de produção	14
Tabela 2. Modelos agrometeorológicos estatísticos mensais de previsão de ATR, utilizando variáveis meteorológicas do ano anterior à colheita. Legenda: As variáveis independentes são T: temperatura média do ar (°C), EXC e DEF: excedente e deficiência hídrica (mm), ARM: armazenamento hídrico do solo (mm), P: precipitação (mm), ETo: Evapotranspiração Potencial (mm), Qg: Radiação global ($W m^{-2}$).....	23
Tabela 3. Modelos agrometeorológicos mensais de previsão de TCH, utilizando variáveis meteorológicas do ano anterior à colheita. Legenda: As variáveis independentes são T: temperatura média do ar (°C), EXC e DEF: excedente e deficiência hídrica (mm), ARM: armazenamento hídrico do solo (mm), P: precipitação (mm), ETo: Evapotranspiração Potencial (mm), Qg: Radiação global ($W m^{-2}$).....	25

1 INTRODUÇÃO

O agronegócio atualmente exige gerenciamento, pois se trata de uma atividade altamente tecnificada e competitiva. A ocasião da comercialização assume papel decisivo no sucesso do negócio, que através de previsões de produtividade indica o futuro resultado financeiro. Então é necessário ter informações com antecedência para o planejamento das atividades, para a construção do orçamento do período, e para a previsão da quantidade de matéria prima disponível.

A cana-de-açúcar é uma planta semiperene que tem grande importância para o Brasil, seu ciclo de cultivo se estende por aproximadamente cinco anos (LEITE et al., 2008). A diversidade de clima e solos em que é cultivada e a escolha da melhor variedade adaptada ao melhor ambiente de produção são aspectos decisivos para conseguir o melhor retorno econômico no ciclo produtivo (UNICA, 2012).

Dessa forma, modelos de cultivos que realizam a previsão de produtividade e qualidade são ferramentas cada vez mais necessárias para o gerenciamento das agroindústrias. Existe diferença entre estimativa e previsão feitas pelos modelos. A estimativa é feita com dados históricos e representa uma condição atual (CARRIERO et al., 2009). Já a previsão é a estimativa feita para o futuro, ou seja, com dados disponíveis atuais simular uma condição futura (CLEMENTS; GALVÃO, 2013).

Estas previsões feitas pela modelagem atreladas à complexidade do cultivo da cana-de-açúcar ganham importância devido à oportunidade de tomadas de decisão mais racionais. Essas decisões influenciam os preços e as empresas têm maior acurácia e agilidade para monitorar o mercado e decidir quando e quanto comercializar sua safra (LEITE et al., 2008).

A estimativa de produtividade e do índice tecnológico que expressa quantidade de açúcar (açúcar total recuperável – ATR) assume um papel essencial também no planejamento orçamentário dos insumos, processo de corte, carregamento, transporte da matéria prima, processamento, armazenamento e comercialização da produção (SCARPARI; BEAUCLAIR, 2009). Segundo Cabrera et al. (2006) as previsões acuradas do clima trazem informações importantes,

principalmente nas tomadas de decisões e no uso do solo e/ou da água nas propriedades.

No cultivo da cana-de-açúcar a previsão da produtividade é realizada na ocasião que antecede a colheita dos canaviais, o método utilizado é baseado na experiência do executor, que percorrendo as áreas e baseando-se em históricos e na sua percepção, realiza a previsão sem parâmetros estatísticos (SCHIMIDT et al., 2001). Outra forma de estimar ou prever a produtividade como os níveis de açúcar dos colmos é por meio de modelos agrometeorológicos. A hipótese deste trabalho é baseada na relação entre as condições meteorológicas com a produtividade e qualidade, sendo possível a previsão desses valores a partir de dados meteorológicos.

Dessa maneira, objetivou-se por meio deste trabalho desenvolver modelos agrometeorológicos estatísticos regionais (Jaboticabal-SP) para realizar a previsão de produtividade em toneladas de cana por hectare (TCH) e qualidade da matéria prima em relação ao açúcar total recuperável (ATR) da cana de açúcar na escala mensal até novembro do ano anterior quando normalmente ocorre o planejamento de gastos com a próxima safra.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A importância do agronegócio da cana-de-açúcar

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, seguido por Índia, Tailândia e Austrália. As regiões de cultivo estão no Sudeste, Centro-Oeste, Sul e Nordeste, permitindo ao País duas safras ao ano e conseqüentemente, produção de açúcar e etanol para os mercados interno e externo (UNICA, 2012).

Segundo dados da Companhia Nacional do Abastecimento (CONAB, 2014), referentes à safra de 2013/2014, a área cultivada de cana-de-açúcar foi de aproximadamente 8,8 milhões de hectares. Desse total, 86,43% estão na região Centro-Sul e os 13,57% restantes na região Norte/Nordeste. Quanto aos dados de moagem, o país processou um total de 653,52 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, a produção nacional de açúcar foi de 37,51 milhões de toneladas, para a produção de etanol este número foi da ordem de 27,54 bilhões de litros.

A cultura da cana-de-açúcar apresenta grande importância no agronegócio brasileiro, representando a indústria sucroenergética cerca de 2% das exportações nacionais, além de reunir 6% dos empregos agroindustriais brasileiros e contribuir de maneira efetiva para o crescimento do mercado interno de bens de consumo (UNICA, 2012). A agroindústria sucroenergética é hoje não apenas de alto valor socioeconômico, mas também estratégica pela participação do etanol e da energia elétrica por ela produzida na matriz energética do país.

A produtividade média nacional da cultura na safra 2012/13 atingiu 74,2 t ha⁻¹.

2.2 Influências do clima no desenvolvimento e produtividade da cana-de-açúcar

A produtividade da cana-de-açúcar pode ser afetada por diversos fatores durante o ciclo como o clima e o manejo. O maior estressor ambiental é a disponibilidade de água para a cultura da cana-de-açúcar sendo este o principal fator climático que interfere na sua produtividade (SANTOS; CARLESSO, 1998). As

plantas frequentemente estão expostas a estresses ambientais. Alguns fatores como temperatura do ar inadequada e baixo armazenamento de água no solo podem trazer estresse para a planta, porém as plantas possuem mecanismos de aclimatação que são ativados em resposta ao déficit hídrico (TAIZ; ZEIGER, 2009).

A cana-de-açúcar é considerada uma planta rústica, ou seja, possui uma grande adaptação às condições climáticas, entretanto apresentará melhores condições quando ocorrer período quente e úmido, com alta radiação solar durante a fase de crescimento, seguido por um período seco, ensolarado e mais frio durante as fases de maturação e colheita (BRUNINI, 2008).

A importância da água para as plantas deve-se à sua contribuição na manutenção e preservação de suas funções vitais, pela constituição de aproximadamente 90% do peso da planta e a atuação em praticamente todos os processos fisiológicos. Seu movimento na planta contribui para a translocação dos solutos absorvidos ou sintetizados pela raiz, dos compostos transportados até a folha (TAIZ; ZEIGER, 2009).

2.2.1 Temperatura do ar

A cana-de-açúcar é muito influenciada pela temperatura em diferentes fases do seu desenvolvimento, pois controla o crescimento e o desenvolvimento das plantas, existe uma temperatura abaixo da qual a planta não mais se desenvolve, e a esse limite inferior define-se como temperatura base inferior e para a cana-de-açúcar é igual a 18 °C (VILLA NOVA et al., 1972).

A ação da temperatura no desenvolvimento da planta pode ser quantificada pelo acúmulo diário da temperatura média descontando-se a temperatura base da cultura, a esse acúmulo de temperatura denomina-se de graus-dia.

Existe também uma faixa de temperatura do ar considerada ótima para o desenvolvimento da cana de açúcar. Para a brotação das gemas, as temperaturas devem variar de 26 °C a 33 °C, já com temperaturas abaixo dos 13 °C ou superiores a 40 °C a brotação é interrompida. Na fase de crescimento das raízes em temperaturas abaixo dos 21 °C estas reduzem seu crescimento; temperaturas de -5 °C a -2,2 °C ocasionam graves prejuízos ou morte das folhas; nos colmos

temperaturas entre $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $-3,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ocorrem à morte da gema apical e temperaturas entre $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ favorecem o crescimento dos entrenós (SEGATO et al., 2006).

De acordo com Argenton (2006) a temperatura mais baixa é favorável à maturação, mas desfavorável ao crescimento vegetativo dos colmos.

A temperatura é fator muito importante para a cana-de-açúcar acumular sacarose, quando ocorre temperatura baixa o desenvolvimento é reduzido e melhora o teor de sacarose, ocorrendo o aumento de temperatura, o crescimento recomeça e o processo de acúmulo de sacarose cessa (VILLA NOVA et al., 1972). O florescimento da cana está diretamente ligado à temperatura, comprimento do dia, umidade do solo e variedade. Quando ocorrem temperaturas noturnas acima de $18\text{ }^{\circ}\text{C}$, baixa umidade e comprimento do dia próximo a 12 horas, há, na maioria dos casos, estímulo do florescimento. Quando ocorrem cinco noites consecutivas com temperatura abaixo de $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ não afetaram o florescimento, entretanto dez noites a prejudicam, e mais de dez noites a inibem (PEREIRA, 1992).

2.2.2 Radiação Solar

A cana-de-açúcar é uma das culturas de maior eficiência fotossintética, ou seja, quanto maior a quantidade de energia luminosa, maior será a taxa de fotossíntese realizada pela planta, ocasionando, maior crescimento e acúmulo de açúcares.

A fotossíntese máxima ocorre com o comprimento de onda da luz azul (na faixa de $0,48\text{ }\mu\text{m}$) e também ocorrem picos, embora menores, na faixa do vermelho (de $0,62$ a $0,64\text{ }\mu\text{m}$) (BARBIERI et al., 1979).

A cana-de-açúcar é uma planta considerada de alta eficiência na conversão de energia radiante em energia química, com taxas fotossintéticas calculadas em até 100 mg de CO_2 fixado por dm^2 de área foliar por hora. Entretanto, alta eficiência fotossintética não está diretamente associada com a elevada produtividade de biomassa. As evidências experimentais indicam que a grande capacidade da cana-de-açúcar para a produção de biomassa reside na alta taxa de fotossíntese (MAGALHÃES, 1987).

A radiação solar está diretamente ligada ao processo de síntese fotossintética

e cuja fonte de energia é a radiação solar, a redução na radiação determina menor armazenamento de açúcares e acumulação de amido nas folhas, portanto altera todo o processo de síntese, prejudicando a eficiência das plantas de cana (BARBIERI, 1993).

Para a maioria das variedades de cana-de-açúcar, são necessárias entre 12 e 12,5 horas de fotoperíodo para a indução do florescimento, e nesse período a ocorrência do florescimento é mais favorável para latitudes entre 0°S e 30°S. O período de florescimento é maior nas baixas latitudes (PEREIRA et al., 2002).

2.2.3 Balanço Hídrico

O balanço hídrico climatológico foi desenvolvido por Thornthwaite e Mather (1955) para determinar o regime hídrico de um local, sem necessidade de medidas diretas das condições de umidade do solo. Nesse balanço, a demanda de água da atmosfera é determinada pela evapotranspiração potencial e a água disponível para o ambiente (solo-planta-atmosfera) é proveniente da precipitação pluvial.

O déficit hídrico pode afetar diretamente no crescimento e no desenvolvimento de culturas provocando alterações no comportamento dos vegetais dependendo do seu genótipo, da duração da severidade ou do estágio de desenvolvimento da planta (SANTOS; CARLESSO, 1998).

Quando as plantas estão submetidas ao déficit hídrico, elas começam a ter alterações que podem prevenir ou tolerar a perda de água. Neste ponto, o sistema radicular é a primeira região da planta a detectar os efeitos do estresse (GRAÇA, 2009).

O estresse hídrico tem vários efeitos sobre o crescimento das plantas um dos quais é a expansão foliar que está ligada à fotossíntese da planta. Quando o conteúdo de água da planta diminui, suas células contraem-se e afrouxa a pressão de turgidez contra as paredes celulares. A expansão foliar é regida pela turgidez que é extremamente sensível ao déficit hídrico (TAIZ; ZEIGER, 2009).

Com a área foliar baixa há menor transpiração, conservando o suprimento de água limitado no solo por um maior período de tempo. Desta forma, a redução da

área foliar pode ser um mecanismo de defesa da planta contra a seca (TAIZ; ZEIGER, 2009).

Para Santos e Carlesso (1998), o déficit hídrico estimula a expansão do sistema radicular para zonas mais profundas e úmidas do solo. Outro ponto a se destacar em relação ao déficit hídrico é o efeito da limitação da fotossíntese. O estresse hídrico moderado afeta a fotossíntese foliar como também a condutância estomática. Durante os primeiros sinais do estresse hídrico, os estômatos começam a fechar e a eficiência do uso de água acaba aumentando, pois, o fechamento estomático inibe a transpiração e diminui as concentrações intercelulares de gás carbônico (CO₂) (TAIZ; ZEIGER, 2009).

Quando o déficit hídrico ocorre, os mecanismos morfológicos da planta são severamente afetados fazendo com que as plantas se adaptem rapidamente a essa nova situação. Desta maneira, a tolerância da planta ao déficit hídrico é um importante mecanismo de resistência para o seu processo produtivo em condições de pouca disponibilidade hídrica para as plantas (SANTOS; CARLESSO, 1998).

2.2.3.1 Umidade do solo

O cultivo de cana-de-açúcar necessita de aproximadamente 1.300 mm de precipitação pluviométrica bem distribuídos ao longo de seu ciclo para obter uma produtividade adequada. A falta ou excesso de água no solo podem afetar significadamente o desenvolvimento da área foliar da cana-de-açúcar como também o desenvolvimento e a duração dos estádios fenológicos da cultura (MAULE et al., 2001).

O consumo de água pode variar em função do estágio fenológico, do ciclo da cultura, das variações climáticas e da disponibilidade de água no solo. Menos de um por cento da água absorvida por uma planta é utilizado quimicamente na fotossíntese, porém, os déficits internos de água das plantas que envolvem porcentagens muito maiores, também afetam a fotossíntese através de meios indiretos. Estes efeitos são normalmente associados com o fechamento dos estômatos, hidratação reduzida do protoplasma do clorênquima, e resistência na difusão de CO₂ entre a atmosfera e os cloroplastos (TAIZ; ZEIGER, 2009).

A retirada da água pelo sistema radicular da planta pressupõe que no equilíbrio hídrico do sistema solo-raiz reside um dos problemas fundamentais da agricultura. A água em excesso no solo altera processos químicos e biológicos, limitando a quantidade de oxigênio e acelerando a formação de compostos tóxicos à raiz. Por outro lado, a percolação intensa da água provoca remoção de nutrientes e inibição do crescimento normal da planta. Embora importantes, os excedentes hídricos não apresentam a mesma ordem de grandeza de problemas, quando comparados à deficiência hídrica (SANTOS; CARLESSO, 1998).

A cana-de-açúcar requer boa quantidade de umidade no solo somente no período de crescimento, uma vez que a água tem papel fundamental na turgescência, translocação e na pressão de crescimento e de turgor, porém durante o período de maturação o ideal é que haja redução na água disponível, não drasticamente, mas o suficiente para reduzir o crescimento e induzir a maior concentração de açúcar nos colmos (BARBIERI; VILLA NOVA, 1977).

2.3 Importância da previsão de produtividade e de açúcar total recuperável em cana-de-açúcar

O agronegócio atualmente exige gerenciamento, pois se tratam de uma atividade altamente tecnificada e competitiva. A comercialização assumiu papel decisivo no sucesso do negócio, que por meio de projeções indicam o futuro resultado financeiro. Então é necessário ter informações com antecedência do planejamento das atividades, orçamento para o período, e a previsão da quantidade de matéria prima disponível.

Estas informações atreladas à complexidade da cadeia de produção da cana-de-açúcar, ganham importância devido à oportunidade que é gerada com a quantidade de produtos disponibilizados no mercado que influencia os preços, desta forma a empresa que tem maior acurácia e agilidade pode monitorar o mercado e decidir quando e quanto de sua safra colocar no mercado.

A estimativa de produção assume um papel essencial para o planejamento orçamentário de insumos, corte e carregamento e transporte da matéria prima,

processamento, armazenamento e comercialização da produção (SCARPARI; BEAUCLAIR, 2009).

Para estimar a produtividade de cana por hectare (TCH) e a quantidade de açúcar (ATR) de uma lavoura de cana-de-açúcar, geralmente nas empresas é usado o conhecimento empírico de técnicos. Estes realizam no período que antecede a colheita uma análise visual ao redor dos carregadores, das quadras de cana de açúcar e calculam a produção utilizando a produtividade do ano anterior, o histórico da área, a precipitação do período, a fertilidade da área entre outros fatores. Entretanto os índices de acerto se tornam maiores à medida que estes levantamentos são realizados próximos ao período da colheita. Outro fator importante é a dimensão do dossel da cultura no momento em que a inspeção do comportamento das plantas principalmente pelas bordas das quadras é realizado, o que pode induzir a erros de alta magnitude nas análises.

2.4 Modelagem para o cultivo da cana-de-açúcar

A modelagem deve abordar os aspectos mais importantes da interação clima-planta-solo, já que a produtividade da cultura depende deste conjunto e sua interação com o manejo (MARIN et al., 2011). O desenvolvimento de modelos baseados em programas computacionais e sua implementação em sistemas de informações agroclimáticas são importantes para o planejamento e elevação da produtividade agrícola (BRAGA, 1995).

Para fins de estimativa da produtividade de cultivos, os modelos baseados em princípios agrometeorológicos mais importantes são aqueles que simulam as fases de desenvolvimento e de maturação das culturas, a disponibilidade de umidade no solo e os efeitos do estresse hídrico na produtividade da cultura (HEINEMANN et al., 2002).

Os modelos podem ser mecanísticos–dinâmicos ou estatísticos. O primeiro tipo busca descrever mudanças diárias nas variáveis da cultura, considerando os principais processos morfofisiológicos que nela ocorrem. O que se tem buscado melhorar nesses modelos é o entendimento fisiológico dos processos de crescimento e desenvolvimento vegetal, e incorporá-los de forma descritivo-

numérica aos mesmos, melhorando, desta forma, os estimadores dos modelos (GOUVEIA et al., 2009). Um ponto importante a ser observado nestes modelos é o efeito do déficit hídrico nos diferentes estádios de desenvolvimento (DOORENBOS; KASSAM, 1979).

Existem diversos modelos mecanísticos de simulação de crescimento da cana-de-açúcar, como: Auscane (JONES et al., 1989), DSSAT/Canegro (INMAN-BAMBER, 1991), QCane (LIU; KINGSTON, 1995), APSIM (KEATING et al., 1999), Mosicas (MARTINÉ, 2003), entre outros. Estes modelos necessitam de calibrações de seus parâmetros em decorrência das diferenças de solo, clima e características genéticas das culturas.

Os modelos estatísticos buscam uma relação quantitativa entre a produtividade/qualidade e os diversos fatores climáticos, de solo e de manejo associados (OLIVEIRA et al., 2013). Normalmente, as técnicas de previsão numérica baseada na agrometeorologia fundamentam-se na relação estatística entre as variáveis dependentes que deverão ser estimadas (produtividade) e as variáveis agrometeorológicas independentes (elementos meteorológicos) (HEINEMANN et al., 2002; ARAÚJO et al., 2014).

Modelos estatísticos também são encontrados na literatura como Moreto e Rolim (2015) que por métodos estatísticos de regressão previram a produtividade da laranja “Valência” em relação às deficiências hídricas mensais no estado de São Paulo. Carvalho et al. (2004) buscaram prever a produtividade de cafeeiros no Estado de Minas Gerais com modelos de regressão. Diante disto os resultados simulados pelos os modelos são variados, dependendo da homogeneidade das condições climáticas, das práticas agrícolas e das características dos solos (SCARPARI; BEAUCLAIR, 2009).

Abordagens alternativas também estão sendo feitas como a utilização de redes neurais que juntamente com sistemas especialistas, ambos fazendo parte de sistemas de inteligência artificial (CARVALHO et al., 1998).

Alguns trabalhos de previsão de produtividade são encontrados na literatura com base probabilística utilizando-se modelos estatísticos diversos. Por exemplo, pode-se citar o trabalho de Mkhabela et al. (2004) que realizaram a previsão da produtividade do milho 2 meses antes da colheita no Sudeste da África. Savin et al.

(2007) que trabalhando com redes neurais conseguiram prever a produtividade final de trigo já durante o período de florescimento com 74% de acurácia na Rússia. Gouranga e Ashwani (2014) realizaram a previsão da produtividade do arroz com 30 dias de antecedência da colheita na Índia. A previsão de produtividade é uma excelente ferramenta para o planejamento da produção agrícola (BOCCA et al., 2015).

O uso do método científico no desenvolvimento de modelos agrometeorológicos, na tomada de decisão, em substituição à intuição e/ou experiência prática, fornece uma ferramenta poderosa, que possibilita a realização de cenários e operações na antecedência necessária trazendo o diferencial competitivo e uma melhoria no planejamento agrícola (GOUVEIA et al., 2009).

2.5 Ambiente de produção

O conceito ambiente de produção para a cultura de cana-de-açúcar foi desenvolvido inicialmente pela Cooperativa dos Produtores de Cana, Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo (Copersucar) na década de 90 (CTC, 1995) através de estudos relacionando dados de produtividade de áreas experimentais com áreas comerciais em diferentes tipos de solos e várias safras. Os ambientes foram definidos pela interação de dois fatores: tipo de solo e produtividade das variedades de cana-de-açúcar.

Para determinação de um ambiente de produção é necessário inicialmente a classificação dos solos. A classificação é a caracterização morfológica, física, química e geográfica dos solos de uma área, podendo ser utilizado para diversos fins. Os solos são classificados após a descrição da cor e textura, estrutura e consistência, análise química em três camadas do solo. Do ponto de vista agrônomo, a primeira camada é a mais importante, pois nela se concentra a maioria das raízes e onde é realizada a maioria das operações de preparo de solo, aplicação de fertilizantes e corretivos (REZENDE, 1997).

As áreas mapeadas são agrupadas normalmente em cinco ambientes de produção de cana-de-açúcar (A, B, C, D e E), partindo do mais para o menos

produtivo, considerando-se o potencial de produção de cada uma delas (JOAQUIM et al., 1996).

Prado (2008) redefiniu os ambientes de produção de cana-de-açúcar em função das condições físico-hídricas, morfológicas, químicas e mineralógicas dos solos, sob manejo adequado da camada arável em relação ao manejo e, principalmente, com o clima local em relação a precipitação pluviométrica, temperatura, radiação solar, evaporação, entre outros.

Dessa forma, os ambientes de produção são compostos por componentes do solo, clima e planta. Os componentes do solo resumem-se em: profundidade do solo, que tem relação direta com a disponibilidade de água e o volume de solo explorado pelas raízes, fertilidade como fonte de nutrientes para as plantas, a textura que está relacionada com os níveis de matéria orgânica, capacidade de troca catiônica (PRADO, 2008).

Os componentes do clima mais críticos para a produção agrícola são normalmente a temperatura do ar, a radiação solar e a chuva. A temperatura do ar regula as taxas de desenvolvimento vegetativo e reprodutivo. A radiação solar provê a energia para a fotossíntese afetando a partição de carboidratos e o crescimento dos componentes individuais da planta. A seca afeta a evapotranspiração, a extração de umidade pelas raízes, a distribuição do sistema radicular, o tamanho do dossel, dessa forma afetando as taxas de desenvolvimento das plantas (HOOGENBOOM, 2000).

Os componentes da cultura estão relacionados com as variedades cultivadas e a genética. A classificação dos ambientes de produção permite conhecer as produtividades potenciais, e os incrementos obtidos pelo correto manejo de solos e varietal, explorando-se o melhor potencial genético da planta e na sua correta alocação.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido no nordeste do Estado de São Paulo (Brasil), na localidade de Jaboticabal-SP (latitude: 21°19'18,15" S; longitude: 48° 06' 27,81" O, altitude: 530 m).

O clima da região, segundo a classificação de Thornthwaite (1948) é do tipo B1rA'a', ou seja, úmido, com pequena deficiência hídrica, megatérmico e evapotranspiração potencial (ETP) no verão menor que 48% da ETP anual. A região tem uma precipitação média de 1.300 mm e chuvas concentradas no período de novembro a fevereiro. A vegetação natural era constituída por floresta tropical subcaducifólia. O relevo é predominantemente suave ondulado, com declividades médias de 3,4%. A área experimental está sob cultivo de cana-de-açúcar há mais de 50 anos e 16 anos de colheita mecanizada sem queima.

Os dados meteorológicos diários foram obtidos por uma estação meteorológica automatizada modelo 21X da marca Campbell Sci. no período de 2001 a 2013 sendo organizados na escala mensal. A estação tem um sistema de transmissão de dados (Vantage Pro Plus Wireless), onde: a medida da radiação solar global (Qg) foi realizada com um sensor (Standard – modelo 6450); a temperatura do ar (T) e a umidade relativa (UR) (sensor externo – modelo 7859); e a precipitação pluviométrica (pluviômetro - modelo 7852, Rain Collector). Os dados pluviométricos referentes ao período de condução do experimento foram coletados em 21 estações pluviométricas distribuídas na área de estudo.

Os dados de tonelada de cana por hectare (TCH) da região foram divididos em 3 ambientes de produção (AP). Estes ambientes de produção correspondem aos sugeridos por CTC (1995) e utilizados em áreas de produção de cana no Brasil.

Esta classificação leva em consideração o potencial de produção em decorrência da integração de três fatores: clima, solo e variedades. Os APs foram: alto, médio e baixo, correspondendo a classificação do CTC a (A e B), (C) e (D e E), respectivamente.

Já os dados de açúcar total recuperável (ATR kg t⁻¹) foram analisados de forma conjunta para o local (Tabela 1).

Tabela 1. Reagrupamento de ambientes de produção.

AMBIENTE DE PRODUÇÃO	CARACTERÍSTICAS
AB	Alta Produtividade, Solos Férteis
C	Média Produtividade, Solos Intermediários
DE	Baixa Produtividade, Solos Restritivos

Tantos os dados meteorológicos como os dados produtivos foram fornecidos por empresa sucroenergética na região de Jaboticabal sendo que os AP AB, C e DE correspondem as áreas de 30.000 ha, 21.000 ha e 13.000 ha, respectivamente.

O cultivo da cana-de-açúcar na região apresenta quatro diferentes estádios em sua fenologia, sendo eles a brotação (1), perfilhamento (2), desenvolvimento (3) e a maturação (4) (GASCHO, SHIH, 1983).

Para cana planta o período com temperatura, radiação e precipitação menores coincidem com o final do estágio de perfilhamento e início do desenvolvimento fase está em que ocorre o repouso vegetativo, ou seja, o acúmulo de massa vegetal é pequeno (Figura 1).

O crescimento da cultura ocorre com grande intensidade a partir de outubro até março quando há condições favoráveis de temperatura, precipitação e radiação, cerca de 75% do acúmulo de massa vegetal ocorre neste período.

Os canaviais colhidos a partir de outubro, já encontram boas condições climáticas para brotação e desenvolvimento, porém a operação pode danificar a cultura devido às condições de trabalho no campo.

Com uma exposição menor ao período ótimo para a cultura, esta modalidade tende a ser a que produz menos proporcionalmente e o teor de açúcar é penalizado pelo consumo da planta ao encontrar condições para a retomada do crescimento.

Fase		Desenvolvimento (1º ano)											
		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Cana Planta	Plantio		Plantio										
	Brotação			Brotação									
	Perfilhamento					Perfilhamento							
	Desenvolvimento									Desenvolvimento			
	Maturação												
	Colheita												
Cana Soca	Brotação				Precoce		Média		Tardia				
	Perfilhamento					Precoce		Média		Tardia			
	Desenvolvimento						Desenvolvimento						
	Maturação												
	Colheita												

Fase		Produção (2º ano)											
		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Cana Planta	Plantio												
	Brotação												
	Perfilhamento												
	Desenvolvimento	Desenvolvimento											
	Maturação			Maturação									
	Colheita					Colheita							
Cana Soca	Brotação												
	Perfilhamento	Tardia											
	Desenvolvimento	Desenvolvimento											
	Maturação			Precoce		Média		Tardia					
	Colheita				Precoce		Média		Tardia				

Figura 1. Fenologia no ano de desenvolvimento (1º ano) e produção (2º ano) para o cultivo canavieiro.

A partir dos dados meteorológicos foi estimado a evapotranspiração potencial (ETP) pelo método de Thornthwaite (1948) na escala mensal, os dados de ETP e P foram utilizados para a estimativa do balanço hídrico climatológico (BH) como proposto por Thornthwaite e Mather (1955) com capacidade de água disponível (CAD) igual a 79 mm para determinação dos componentes do balanço hídrico como evapotranspiração real (ETR), armazenamento de água no solo (ARM), excedente (EXC) e deficiência (DEF) hídrica. A determinação do valor da CAD foi feita em laboratório pela determinação da curva de retenção, com umidade da capacidade de campo = 22%, umidade do ponto de murcha permanente = 15%, densidade

aparente do solo = $1,25 \text{ gcm}^{-3}$ e profundidade do sistema radicular = 0,90m. A classe predominante de solos na área de estudo é a dos Latossolos.

Realizou-se a análise de correlação para identificar quais elementos meteorológicos e do BH nos diferentes meses apresentam maior correlação com o TCH e ATR. Sendo retiradas as variáveis que apresentaram uma correlação $r > = |0,7|$ para evitar problemas de multicolinearidade. Quando as variáveis colineares são retiradas é possível a avaliação dos coeficientes angulares dos modelos permitindo a determinação das variáveis mais influentes na previsão.

As variáveis que apresentaram maior relevância foram selecionadas para a construção dos modelos agrometeorológicos, objetivando a previsão de produtividade e qualidade da cana-de-açúcar. Nesta construção, foi usado o método de regressão linear múltipla (equação 1).

$$Y = a \times X_1 + b \times X_2 + c \times X_3 + \dots + CL \quad (1)$$

sendo, Y a produtividade em kg ha^{-1} ou ATR para um mês específico; a, b, c,... são os coeficientes (pesos) ajustados, X_1, X_2, X_3, \dots são as variáveis meteorológicas e de balanço hídrico mensais selecionadas do ano anterior ao da colheita (Qg, T, UR, P, ETo, ARM, EXC, DEF) de janeiro a dezembro e CL o coeficiente linear.

O maior problema na regressão linear múltipla é a seleção das variáveis independentes a serem combinadas para gerar modelos significativos. Qualquer método numérico iterativo como os de “*stepwise*” tem problemas de estabilização em erros locais devido a combinações iniciais impróprias. Então como sugerido por Walpole et al. (2012) uma opção é o teste de todas as combinações possíveis (APC) quando o número de variáveis independentes é relativamente pequeno.

Neste trabalho, apesar do grande número de variáveis independentes ($Qg_{\text{JAN}} \dots Qg_{\text{DEZ}}; T_{\text{JAN}} \dots T_{\text{DEZ}}; \dots$), utilizou-se a metodologia APC testando-se modelos com até 4 variáveis independentes do ano de desenvolvimento em escala mensal, foi desenvolvido através da linguagem Visual Basic, um aplicativo (VBA) para a realização dos cálculos, perfazendo 1.584.740 equações possíveis para cada variável, qualidade (ATR) e produtividade (TCH), totalizando 6.338.960 equações testadas para cada mês. O critério aplicado para a seleção de variáveis foi à

significância dos coeficientes ($t < 0.05$) e da regressão ($F < 0.05$), além da minimização do erro percentual absoluto médio (MAPE) e maximização de R^2 ajustado.

Após essa etapa, aos modelos selecionados foram aplicadas análises de acurácia pelo Erro Percentual Absoluto Médio (MAPE), precisão pelo coeficiente de determinação ajustado (R^2) (CORNELL; BERGER, 1987), equações 2 e 3. Foram utilizados os períodos de 2002 a 2009 para calibração e 2010 a 2013 para os testes.

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^N \left(\left| \frac{Y_{est_i} - Y_{obs_i}}{Y_{obs_i}} \right| * 100 \right)}{N} \quad (2)$$

$$R^2 \text{ adjust} = \left[1 - \frac{(1 - R^2) \times (N - 1)}{N - k - 1} \right] \quad (3)$$

sendo, Y_{est_i} : variável estimada; Y_{obs_i} : variável observada; Y_{est-C} : a variável estimada por regressão linear entre a variável observada (Y_{obs_i}) e estimada (Y_{est_i}) N : número de dados e k : número de variáveis independentes da regressão.

Foram realizadas análises de sensibilidade dos coeficientes angulares das variáveis climáticas a fim de encontrar quais destas variáveis tiveram maior influência no ATR e o TCH na região. Foram separados os dez modelos mais acurados para a previsão do ATR e TCH para cada um dos ambientes produtivos, posteriormente foi realizado as classificações das variáveis mais influentes pela análise de sensibilidade dos coeficientes angulares.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A região de estudo apresenta condições climáticas favoráveis ao desenvolvimento do cultivo da cana de açúcar. Em relação às condições climáticas, a temperatura do ar média (T) variou de 21 a 26 °C, a temperatura máxima (Tmax) chegou a 33 °C no verão e a mínima (Tmin) chegou a 13 °C no inverno, e a radiação global (Qg) variou de 14 a 21 W m⁻². O índice pluviométrico médio (P) no período de outubro a março foi de 180 mm e no período de abril a setembro foi de 40 mm (Figura 2).

Os menores armazenamentos hídricos (ARM) ocorrem no inverno, sendo em setembro o mês de menor armazenamento, chegando a 18 mm de toda a capacidade do solo. Analisando os componentes do balanço hídrico observou-se que no período de novembro a abril ocorrem excedentes hídricos (EXC) acentuados, que chegam a aproximadamente 200 mm em janeiro.

Por sua vez, em relação à deficiência hídrica (DEF) ocorre entre maio a outubro, sendo em agosto a deficiência mais acentuada, chegando a 75 mm (Figura 2).

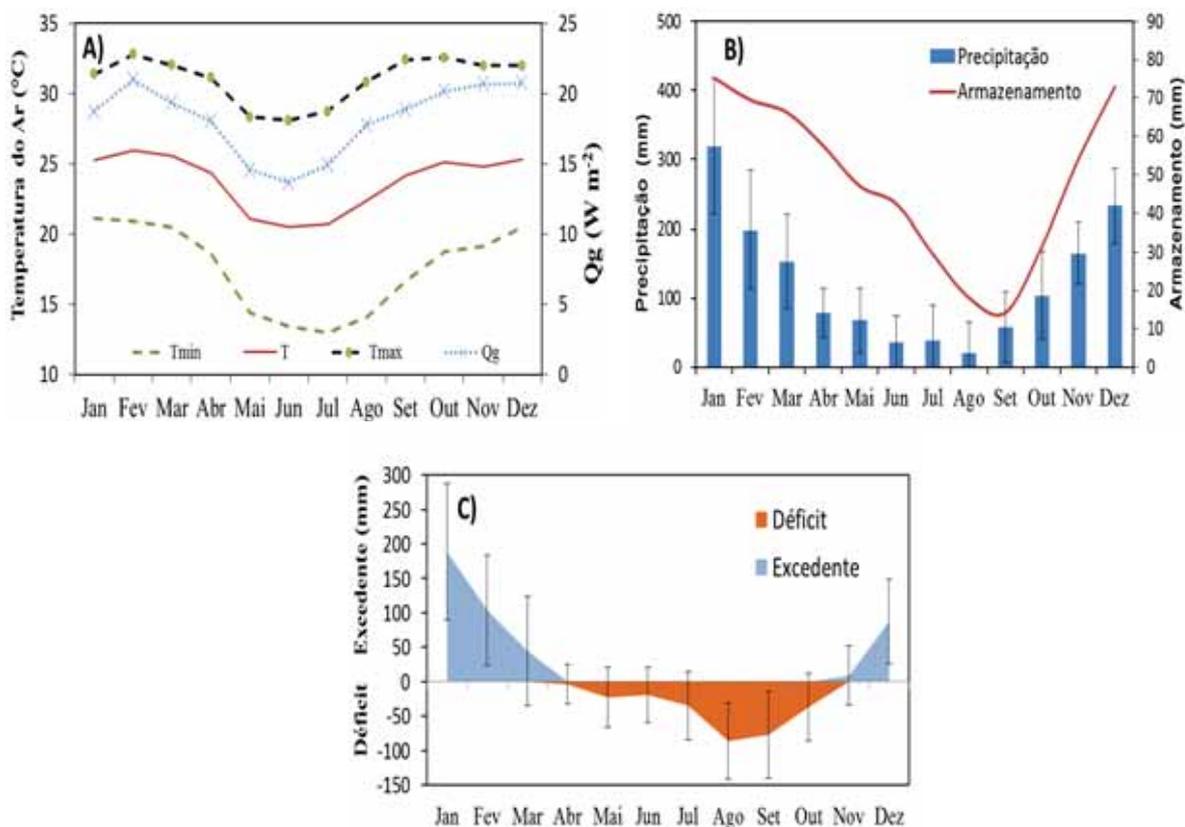


Figura 2. Caracterização climática mensal para a localidade de Jaboticabal-SP, A) temperatura do ar média mensal (mínima, média e máxima) (°C) e a radiação global (W m⁻²); B) precipitação pluviométrica média mensal, armazenamento de água no solo (mm) e C) componentes do balanço hídrico climatológico (excedente e deficiência hídrica, mm).

Houve diferenças de TCH e ATR mensais nos diferentes ambientes produtivos, como o ambiente AB apresenta características de armazenamento de água e nutrição favoráveis, o mesmo contribui para maior longevidade do canavial, ocasionando uma produtividade média elevada ao cultivo. Por sua vez, nos ambientes C e DE os cultivos apresentam uma menor longevidade, conseqüentemente os canaviais são renovados mais cedo em relação ao ambiente AB.

A diminuição da média de TCH nos ambientes desfavoráveis em novembro é causada por ocorrerem anos em que no período onde normalmente há melhores condições para o desenvolvimento do canavial fica abaixo da média, ou seja, a cultura fica exposta a um Balanço Hídrico desfavorável então a deficiência hídrica proporciona queda do TCH. Em relação ao ATR, após o mês de maio há um incremento ocasionado pelo estresse percebido pela cultura, devido ao menor índice

pluviométrico e temperatura amena, sendo o máximo de acúmulo em setembro.

Após este mês ocorre aumento no índice pluviométrico e da temperatura, onde a cultura termina o repouso vegetativo e retoma o desenvolvimento, levando a planta a consumir parte da reserva, a absorção de água do solo dilui o açúcar acumulado determinando a redução do ATR no final do ciclo (Figura 3).

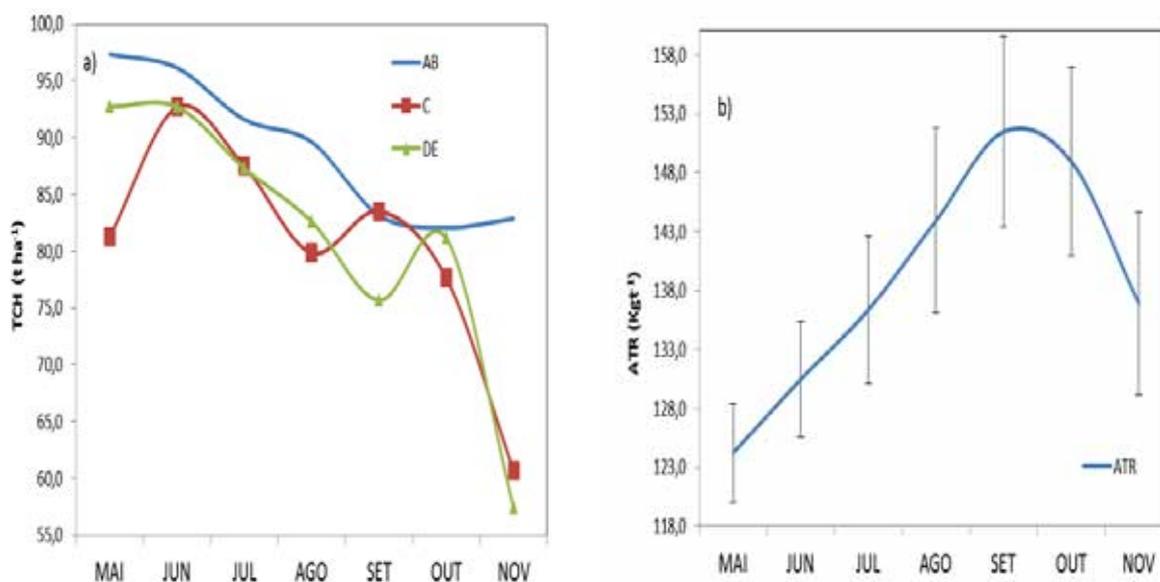


Figura 3. a) Tonelada de colmo por hectare (TCH) e b) Açúcar total recuperável (ATR kg t⁻¹) no período entre maio de 2002 a novembro 2013. As barras verticais indicam valores máximos e mínimos observados no período.

Por exemplo, no desenvolvimento de modelos agrometeorológicos para prever a produtividade e qualidade da cana de açúcar com o uso do método APC com até quatro variáveis nos modelos, houve um total de 1.584.740 combinações de variáveis independentes possíveis (Figura 4) para cada mês, foram utilizadas até 4 variáveis devido ao limite computacional para a geração e teste dos modelos.

Após as retiradas dos modelos em que as variáveis apresentavam multicolinearidade (849.317), os modelos viáveis (735.423) foram utilizados para as previsões em Jaboticabal-SP.

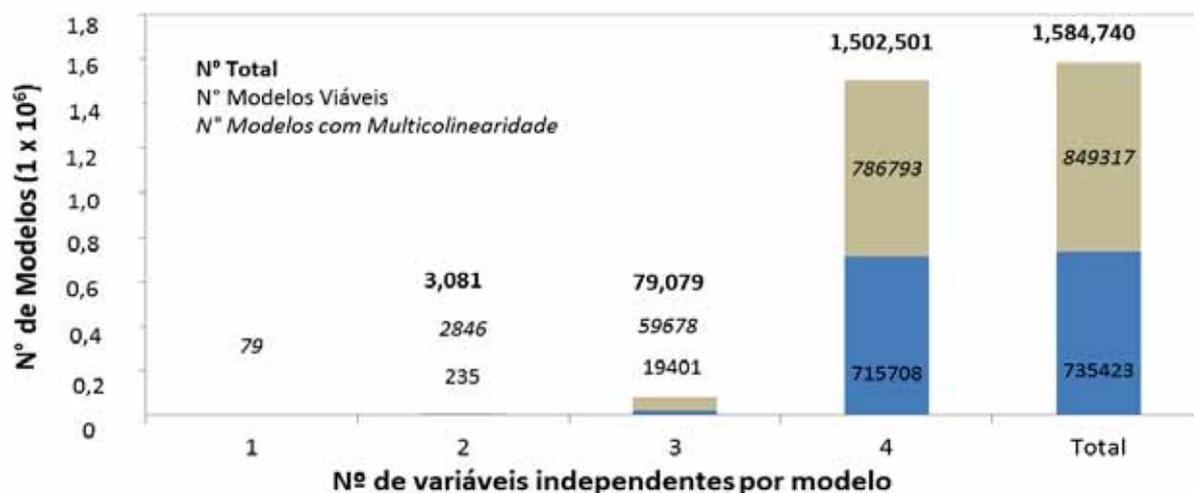


Figura 4. Quantidade de modelos gerados e testados para cada mês em relação à multicolinearidade para a elaboração dos modelos agrometeorológicos de previsão de qualidade e produtividade de cana de açúcar.

Verificou-se que o método APC foi eficiente, uma vez que à medida que aumentou a precisão (R^2 adj ≈ 1.00), ocorreu a redução do valor-p e MAPE chegando cada vez mais próximo a zero, indicando a melhor opção de modelos (Figura 5).

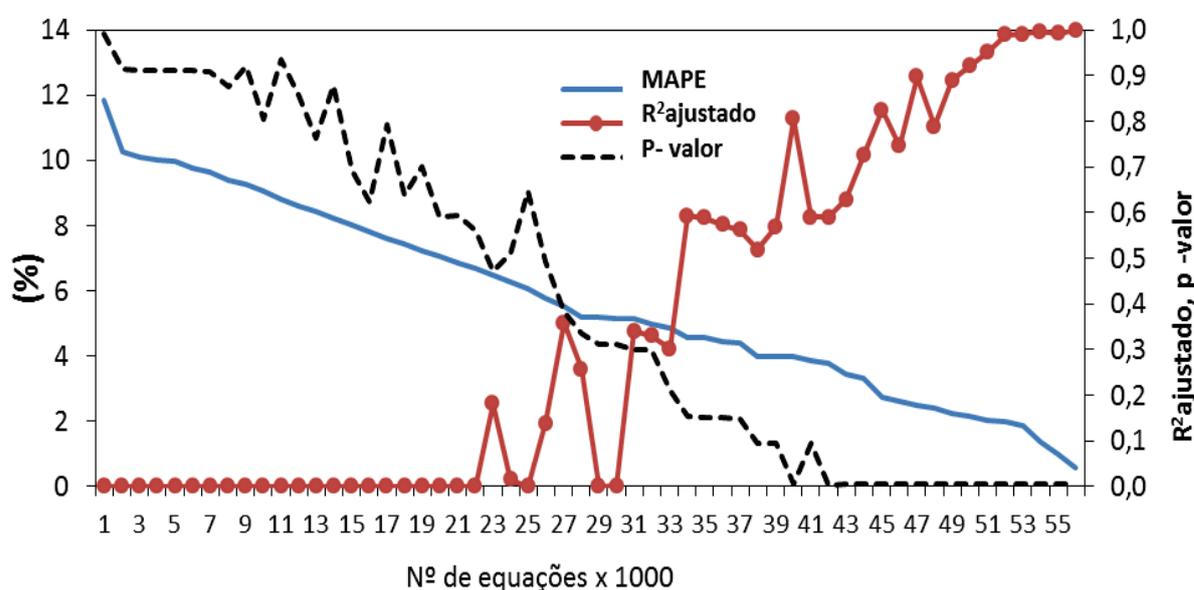


Figura 5. Exemplo de ordenação para a classificação dos modelos segundo os critérios de acurácia (menor MAPE), precisão (maior R^2 ajustado) e confiabilidade (menor p-valor).

Os melhores modelos para previsão do ATR demonstraram que o T_{JUN} e a T_{NOV} foram as variáveis de maior peso, sendo em sua maioria com coeficientes positivos,

sugerindo uma relação de forma direta (Figura 6). Por sua vez, os modelos para previsão do TCH, as variáveis T_{AGO} , T_{NOV} e T_{AGO} foram às de maior peso, nos ambientes AB, C e DE, respectivamente, demonstrando uma relação direta com a produtividade, provavelmente esta temperatura afeta o final do perfilhamento.

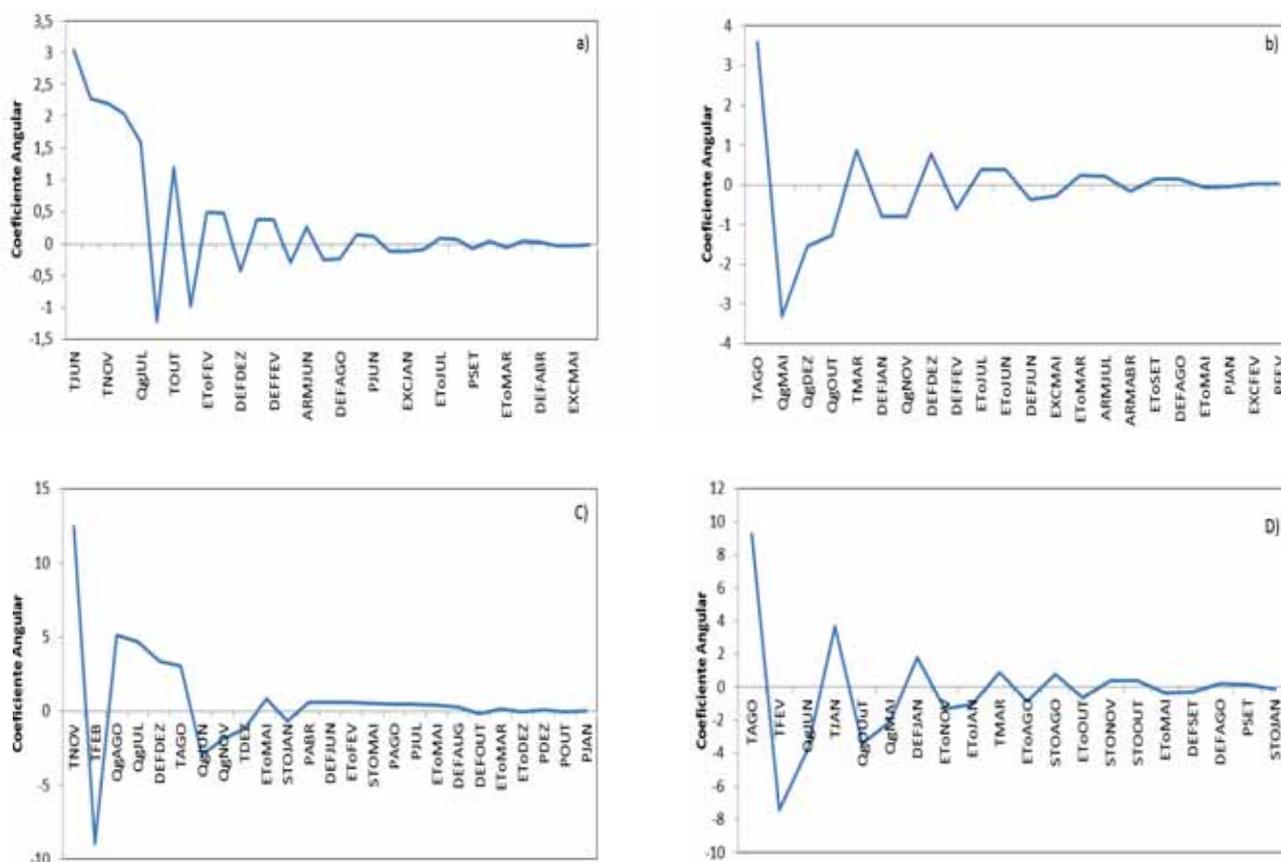


Figura 6. Análise de sensibilidade dos valores médios dos coeficientes angulares dos dez melhores modelos de previsão do a) ATR; b) TCH (ambiente AB); c) TCH (ambiente C) e d) TCH (ambiente DE).

Os modelos agrometeorológicos têm demonstrado grandes vantagens, uma vez que, com a utilização das variáveis climáticas nas previsões, há uma redução nos riscos das atividades, tornando os empreendimentos agrícolas mais confiáveis (HAMMER et al., 2000; ARAÚJO et al., 2014).

Todos os modelos calibrados foram significativos estatisticamente e acurados, uma vez que os maiores valores-p e MAPE foram de 0,096 e 7,523%, respectivamente. Os modelos que apresentaram menores valores-p e MAPE foram ATR_{JUL} e ATR_{NOV} (Tabela 2). Os testes para os modelos de previsão de ATR para

todos os meses foram acurados, pois o MAPE mínimo foi de 0,435% na previsão de novembro e o máximo de 1,60% na previsão de maio (Tabela 2).

Nos modelos agrometeorológicos de previsão de ATR (Tabela 1) as variáveis mais influentes foram P, ETo, DEF e Qg pois as variáveis ocorreram em grande parte dos modelos, seus respectivos coeficientes angulares foram maiores em média que os demais.

Por exemplo, o modelo ATR_{NOV} foi o que conseguiu a previsão mais antecipada com 17 meses de antecipação, tendo como a variável mais importante a T de março. Por sua vez, a menor antecipação foi encontrada no modelo ATR_{MAI} que demonstrou uma antecipação de cinco meses, sendo que a ETo de setembro teve o maior peso (Tabela 2).

Tabela 2. Modelos agrometeorológicos estatísticos mensais de previsão de ATR, utilizando variáveis meteorológicas do ano anterior à colheita. Legenda: As variáveis independentes são T: temperatura média do ar (°C), EXC e DEF: excedente e deficiência hídrica (mm), ARM: armazenamento hídrico do solo (mm), P: precipitação (mm), ETo: Evapotranspiração Potencial (mm), Qg: Radiação global ($W m^{-2}$).

Modelo(ATR)	Calibração		Teste		
	p-Valor	MAPE	R ² Ajust	MAPE	R ² Ajust
Maio					
$ATR = 0,0566 \cdot ARM_{MAI} + 0,0744 \cdot ETo_{SET} - 0,0345 \cdot ETo_{DEZ} + 0,0403 \cdot P_{OUT} + 120,0658$	0,033	0,228	0,951	1,606	0,667
Junho					
$ATR = -0,0632 \cdot EXC_{JAN} + 0,1762 \cdot ARM_{MAI} + 0,0995 \cdot ETo_{MAI} + 4,0855 \cdot T_{MAI} + 45,5615$	0,028	0,244	0,957	1,176	0,879
Julho					
$ATR = -0,1373 \cdot DEF_{SET} + 0,0888 \cdot DEF_{OUT} + 0,2106 \cdot ETo_{ABR} + 0,9202 \cdot Qg_{AGO} + 110,43$	0,003	0,124	0,996	0,473	0,976
Agosto					
$ATR = -0,2455 \cdot DEF_{JUN} + 0,4211 \cdot ETo_{JAN} - 0,7641 \cdot Qg_{SET} + 4,4104 \cdot T_{MAI} + 27,7477$	0,017	0,410	0,970	0,660	0,950
Setembro					
$ATR = 0,0593 \cdot DEF_{OUT} + 0,1871 \cdot P_{MAI} + 0,1220 \cdot P_{NOV} + 5,0200 \cdot Qg_{JUN} + 49,1647$	0,026	0,520	0,960	0,930	0,971
Outubro					
$ATR = -1,2075 \cdot DEF_{FEV} + 0,2509 \cdot ARM_{AGO} - 0,4817 \cdot ETo_{AGO} + 3,5906 \cdot Qg_{OUT} + 92,4914$	0,005	0,199	0,992	1,032	0,871
Novembro					
$ATR = 0,0268 \cdot EXC_{JAN} - 0,2898 \cdot ARM_{MAI} - 0,0240 \cdot P_{FEV} + 1,5479 \cdot T_{MAR} + 106,5084$	0,031	0,419	0,953	0,435	0,964

Em relação os testes para os modelos de previsão de TCH em todos os meses os modelos foram acurados, demonstrando um MAPE mínimo de 1,89% no ambiente

AB para o mês de maio e um MAPE máximo de 7,523 no ambiente DE para o mês de agosto (Tabela 3).

Dentre os modelos agrometeorológicos de previsão de TCH (Tabela 3) as variáveis mais influentes foram a Qg, ETo, ARM e DEF, pois as variáveis ocorreram praticamente em todos os meses, apresentando elevados coeficientes angulares.

Analisando o modelo calibrado para o mês de novembro observou-se a presença da variável DEF em todos os ambientes analisados, mostrando a relevância dessa variável em diferentes ambientes e em todas as épocas do ano.

Na previsão do TCH em maio o ambiente AB apresentou o melhor modelo entre os demais, com MAPE = 1,89%, R^2 adj = 0,90 nos testes. Considerando um valor médio de $90,6 \text{ T ha}^{-1}$ na região, o modelo erra aproximadamente $1,7 \text{ T ha}^{-1}$. A variável de maior influência neste modelo foi a DEF do mês de janeiro (Tabela 3).

O modelo TCH_{OUT} no ambiente C foi o que conseguiu a previsão mais antecipada, realizando a previsão com 17 meses de antecedência, sendo que a variável com relevância do modelo foi a ETo de maio. Por sua vez, a menor antecipação foi encontrada no modelo TCH_{MAI} no ambiente DE, que demonstrou uma antecipação de sete meses e a variável com relevância do modelo foi a T de janeiro (Tabela 3). Utilizando o modelo GCM (general circulation models) de previsão de clima, Kogan et al. (2013) conseguiram um tempo de antecipação entre 2 e 3 meses na previsão de trigo na Ucrânia.

Tabela 3. Modelos agrometeorológicos mensais de previsão de TCH, utilizando variáveis meteorológicas do ano anterior à colheita. Legenda: As variáveis independentes são T: temperatura média do ar (°C), EXC e DEF: excedente e deficiência hídrica (mm), ARM: armazenamento hídrico do solo (mm), P: precipitação (mm), ETo: Evapotranspiração Potencial (mm), Qg: Radiação global ($W m^{-2}$).

Ambiente de Produção		Calibração		Teste		
		p-Valor	MAPE	R ² Ajust	MAPE	R ² Ajust
Maio						
AB	TCH = -0,8047 . DEF _{JAN} - 0,0370 . DEF _{AGO} + 0,7723 . DEF _{SET} + 0,2196 . ARM _{JUL} + 87,7535	0,049	1,340	0,926	1,893	0,909
C	TCH = 0,5854 . ETo _{FEV} + 0,1565 . ETo _{MAR} + 0,2419 . P _{AGO} - 2,9197 . Qg _{JUN} + 42,3904	0,002	0,331	0,997	5,739	0,973
DE	TCH = -0,2608 . DEF _{SET} - 2,1021 . Qg _{MAI} - 3,3693 . Qg _{OUT} + 3,6777 . T _{JAN} + 118,2424	0,004	0,420	0,993	3,052	0,828
Junho						
AB	TCH = 0,0306 . EXC _{JAN} + 0,1846 . ETo _{AGO} + 0,1187 . P _{ABR} + 6,3202 . Qg _{JUL} - 19,0031	0,090	1,118	0,862	2,124	0,867
C	TCH = 0,1520 . ARM _{ABR} + 1,1584 . ETo _{JAN} + 0,9407 . ETo _{JUL} + 2,5358 . T _{JUL} - 121,0817	0,053	1,624	0,918	5,114	0,869
DE	TCH = 0,7212 . DEF _{MAI} + 0,6325 . ARM _{JUL} + 0,5104 . ETo _{MAR} - 1,7991 . Qg _{OUT} + 41,5761	0,002	0,342	0,997	3,555	0,821
Julho						
AB	TCH = 0,2687 . ARM _{JUN} + 0,2690 . ETo _{JAN} + 0,0767 . P _{MAR} - 2,1432 . Qg _{JUN} + 73,0103	0,084	1,284	0,872	3,295	0,840
C	TCH = 1,2609 . DEF _{MAI} + 0,3897 . EXC _{FEV} + 1,9317 . ARM _{JUN} - 11,3161 . Qg _{AGO} + 150,0125	0,033	4,064	0,949	5,659	0,974
DE	TCH = -0,0928 . DEF _{OUT} + 0,5611 . ETo _{MAI} - 0,0529 . P _{FEV} - 1,3961 . Qg _{OUT} + 103,7103	0,000	0,146	1,000	2,015	0,982
Agosto						
AB	TCH = 0,3013 . ETo _{AGO} + 0,1838 . P _{ABR} + 0,0865 . P _{OUT} + 3,0902 . Qg _{FEV} - 5,8093	0,001	0,186	0,999	4,222	0,955
C	TCH = 0,1598 . DEF _{JAN} + 0,7641 . ARM _{MAI} - 0,4127 . ETo _{ABR} + 0,0712 . Qg _{ABR} + 67,7622	0,082	1,736	0,875	4,621	0,969
DE	TCH = 0,9012 . ARM _{MAI} - 0,6597 . ETo _{JUN} - 3,3852 . Qg _{MAR} + 4,8836 . T _{FEV} + 7,5267	0,002	0,412	0,996	7,523	0,863
Setembro						
AB	TCH = -0,1386 . EXC _{JAN} - 2,1599 . ARM _{DEZ} + 0,3089 . P _{JUN} + 5,7292 . T _{OUT} + 118,3829	0,051	0,849	0,922	5,583	0,675
C	TCH = -2,2532 . ARM _{JAN} + 1,1436 . ARM _{MAI} + 12,1593 . Qg _{ABR} - 4,1671 . T _{MAR} + 122,3014	0,051	1,586	0,923	6,850	0,991
DE	TCH = 0,3245 . DEF _{ABR} - 0,3145 . ETo _{JUN} - 7,7541 . Qg _{AGO} + 1,9522 . T _{SET} + 170,9180	0,001	0,455	0,999	3,829	0,891
Outubro						
AB	TCH = 0,0488 . EXC _{OUT} + 0,3837 . ARM _{MAI} + 0,4429 . ETo _{AGO} - 0,2173 . P _{JUL} + 59,6127	0,096	1,565	0,852	3,286	0,962
C	TCH = 0,0609 . DEF _{MAI} - 0,0514 . EXC _{JAN} - 0,0847 . EXC _{FEV} + 0,2401 . ETo _{MAI} + 84,9556	0,009	0,433	0,986	3,204	0,707
DE	TCH = -0,0860 . EXC _{FEV} + 1,7785 . ARM _{JAN} - 0,2086 . ARM _{SET} + 0,6877 . ETo _{OUT} - 97,4830	0,005	0,679	0,993	5,836	0,650
Novembro						
AB	TCH = -0,6352 . DEF _{NOV} + 0,3010 . P _{MAI} + 6,3428 . Qg _{JAN} - 6,4148 . Qg _{AGO} + 68,0824	0,008	0,570	0,987	2,177	0,945
C	TCH = -0,7840 . DEF _{JUN} - 0,5282 . EXC _{OUT} + 6,5426 . Qg _{SET} - 4,0980 . T _{MAR} + 91,0047	0,009	0,203	1,000	5,117	0,628
DE	TCH = -1,9463 . DEF _{JAN} + 0,8956 . DEF _{SET} + 1,0285 . ARM _{AGO} - 10,1168 . T _{JAN} + 239,5707	0,016	2,372	0,975	5,634	0,953

Os resultados das previsões para as variáveis TCH em todos os ambientes e do ATR no decorrer do ano são mostradas na Figura 7. Por exemplo, os valores do TCH no ambiente AB para o mês de maio são em média 97,2 t ha⁻¹, podendo variar de 94,2 a 100,1 t ha⁻¹ (Figura 7A).

As variações são devido ao comportamento das variáveis independentes no período de teste (2010 a 2013).

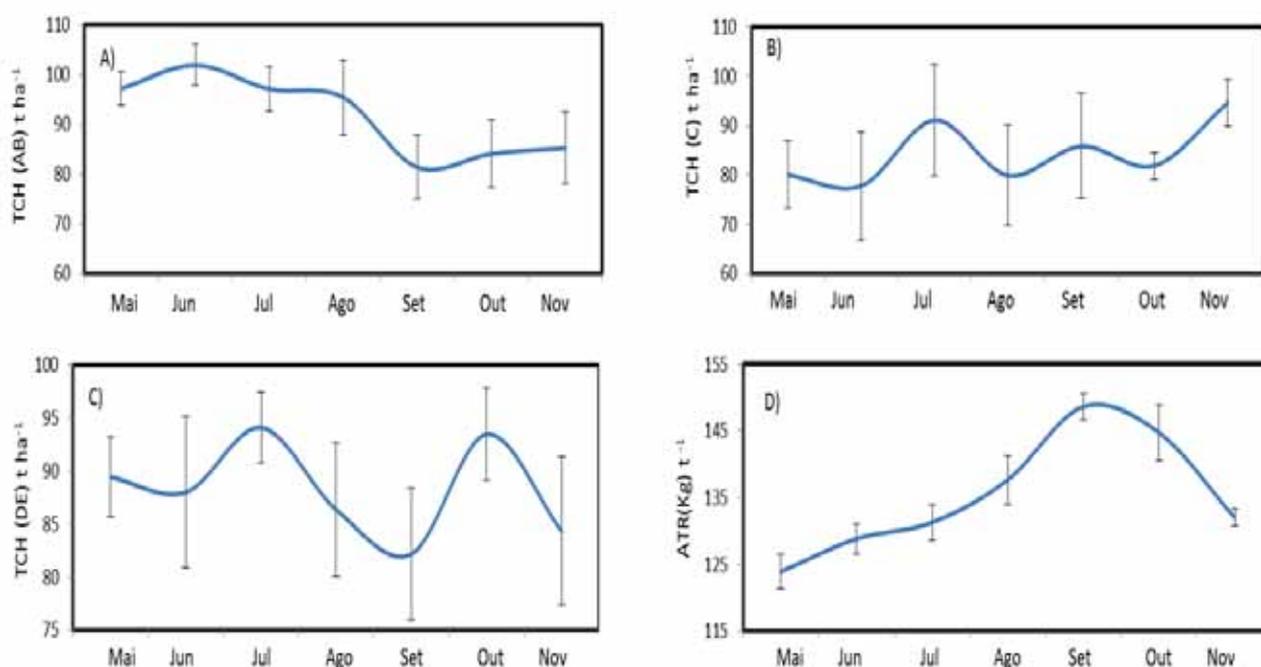


Figura 7. Dados previstos mensais do TCH em todos os ambientes (a,b e c) e ATR (d) com o respectivo intervalo de confiança (95%) no período de 2010 a 2013.

Os modelos mensais desenvolvidos neste trabalho tiveram bom desempenho em suas previsões. A análise geral das performances dos modelos em comparação aos dados independentes de ATR e TCH com todos os meses (Figura 8) demonstra uma elevada precisão nas previsões, pois o R² ajustado mínimo encontrado foi de 0,86 para TCH no ambiente DE, que sofre renovações precoces devido a grande interferência de pragas e a fertilidade inferior do solo (Figura 8 d). Os modelos agrometeorológicos tem mostrado grandes vantagens, auxiliando no controle dos riscos, tornando os projetos agrícolas mais confiáveis (HAMMER et al., 2000; ARAÚJO et al., 2014).

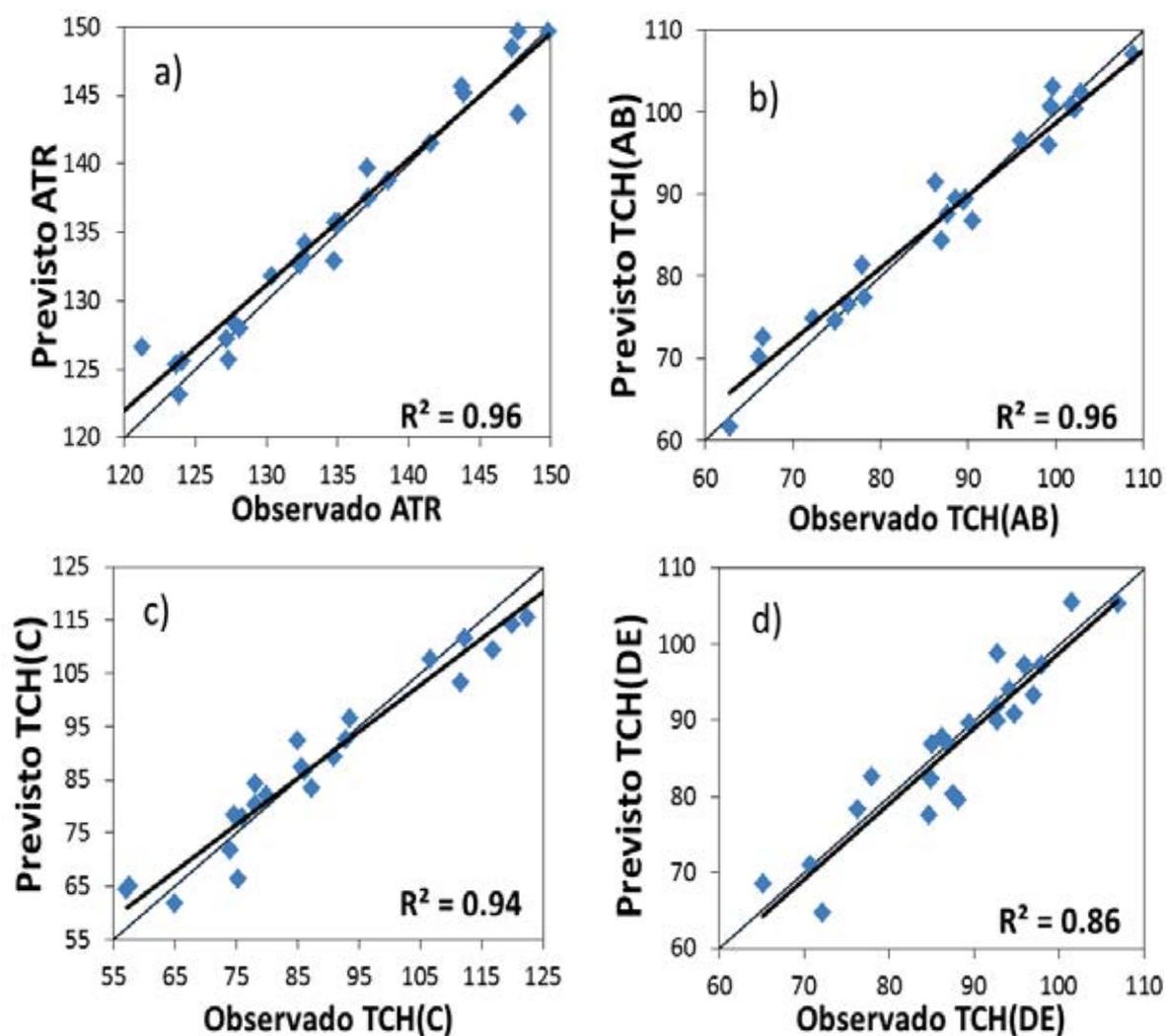


Figura 8. Análise geral da precisão das previsões mensais dos modelos de (ATR) açúcar total recuperável (a) e produtividade (TCH) nos ambientes AB (b), C (c) e DE (d) para a localidade de Jaboticabal-SP.

5 CONCLUSÕES

O processo de seleção de variáveis e as regressões lineares múltiplas utilizadas na construção dos modelos para previsão de qualidade e produtividade da cana de açúcar em diferentes ambientes para a região de Jaboticabal do estado de São Paulo foram eficientes, pois os valores encontrados dos critérios utilizados para a seleção dos modelos: MAPE, R^2 e p-valor foram adequados.

Foi possível o desenvolvimento de modelos acurados para todos os meses em função das variáveis climáticas. As variáveis climáticas mais importantes para previsão de TCH e ATR foram Q_g , E_{to} e DEF. A antecipação mínima encontrada para previsão de qualidade (ATR) foi de cinco meses. Esta antecipação foi devido a seleção da variável $E_{to_{DEZ}}$ para prever ATR de maio. Para produtividade (TCH) a antecipação mínima foi de sete meses pois a variável $Q_{g_{OUT}}$ aparece para a previsão de TCH de maio no ambiente DE.

5.1 Próximos passos

Difundir a utilização dos modelos nas empresas e ampliar o mesmo tipo de estudo em outras regiões.

5.2 Crítica a metodologia e aos resultados

A metodologia utilizada (APC) exige alta capacidade computacional para a seleção e análise dos modelos.

É necessário um banco de dados confiável e uma série histórica longa.

Deve-se utilizar os modelos como ferramenta adicional na tomada de decisão.

6 REFERÊNCIAS

ARAÚJO, E. C., URIBE-OPAZO, M. A.; JOHANN, J. A. Modelos de regressão espacial para estimativa da produtividade da soja associada a variáveis agrometeorológicas na região do estado do Paraná. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 34, n. 2, p. 286-299, 2014.

ARGENTON, P. E. **Influência das variáveis edafoclimáticas e de manejo no rendimento de variedades de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) na região de Piracicaba, São Paulo**. 2006. 110 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

BARBIERI, V.; VILLA NOVA, N. A. **Climatologia e a cana-de-açúcar**. Araras: PLANALSUCAR – Coordenadoria Regional do Sul – COSUL, 1977. p.1-22.

BARBIERI, V.; BACCHI, O. O. S.; VILLA NOVA, N. A. Análise do fator temperatura média do ar no desenvolvimento da cana-de-açúcar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 1., 1997, Mossoró. **Anais...** Mossoró: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1979. p. 192-197.

BARBIERI, V. **Condicionamento climático da produtividade potencial da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.): um modelo matemático-fisiológico de estimativa**. 1993. 140 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1993.

BOCCA, F. F.; RODRIGUES, L. H. A.; ARRAES, N. A. M. When do I want to know and why? Different demands on sugarcane yield predictions. **Agricultural Systems**, Amsterdam, v. 135, p. 48–56, 2015.

BRAGA, H. J. **Previsão agrícola: uma nova abordagem – Uso de scanner aerotransportável e redes neurais**. 1995. 243 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1995.

BRUNINI, O. Ambientes climáticos e exploração agrícola da cana-de-açúcar. In: DINARDOMIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M. de; ANDRADE LANDELL, M. G. de. **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2008. p. 205-218.

CABRERA, V. E.; FRAISSE, C. W.; LETSON, D.; PODESTÁ, G.; NOVAK, J. Impact of climate information on reducing farm risk by optimizing crop insurance strategy. **Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers**, St. Joseph, v. 49, n. 4, p. 1223–1233, 2006.

CARRIERO, A.; KAPETANIOS, G.; MARCELLINO, M. Forecasting exchange rates with a large bayesian VAR. **International Journal of Forecasting**, Amsterdam, v. 25, n. 2, p. 400-417, 2009.

CARVALHO, L. G.; SEDIYAMA, G. C.; CECON, P. R.; ALVES, H. M. R. Modelo de regressão para a previsão de produtividade de cafeeiros no Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 8, n. 2-3, p. 204-211, 2004.

CARVALHO, A. P. L. F.; BRAGA, A. P.; LUDEMIR, T. B. **Fundamentos de redes neurais artificiais**. Rio de Janeiro: UFRJ, 1998. 246 p.

CLEMENTS, M. P.; GALVÃO, A. B. Forecasting with vector autoregressive models of data vintages: US output growth and inflation. **International Journal of Forecasting**, Amsterdam, v. 29, n. 4, p. 698–714, 2013.

CONAB – **Companhia Nacional de Abastecimento**. 2015. Disponível em: <www.conab.gov.br>. Acesso em: 13 nov. 2014.

CORNELL, J. A.; BERGER, R. D. Factors that influence the coefficient of determination in single linear and nonlinear models. **Phytopathology**, St. Paul, v. 77, n. 1, p. 63-70.1987.

CTC – Centro de Tecnologia Copersucar. **Potencial de Produção**. Piracicaba: CTC, 1995. 17 p. (Boletim Agrícola).

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water**. FAO: Irrigation and Drainage, Rome: FAO, 1979. 172 p. (Paper 33).

GASCHO, G. J.; SHIH, S. F. Sugar cane. In: TEARE I. D.; PEET M. M. (Eds.). **Crop-water relations**. 1. ed. New York: Wiley-Interscience, 1983. p. 445-479.

GRAÇA, J. P. **Avaliação de parâmetros fisiológicos em cultivares de cana-de-açúcar submetida ao déficit hídrico**. 2009. 51 f. Dissertação (Mestrado em Genética e Melhoramento de Plantas). Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, 2009.

GOURANGA, K.; ASHWANI, K. Forecasting rainfed rice yield with biomass of early phenophases, peak intercepted PAR and ground based remotely sensed vegetation indices. **Journal of Agrometeorology**, Beijing, v. 16, n. 1, p. 94-103, 2014.

GOUVÊA, J. R. F.; SENTELHAS, P. C.; GAZZOLA, S. T.; SANTOS, M. C. Climate changes and technological advances: impacts on sugarcane productivity in tropical Southern Brazil. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 66, n. 5, p. 593-605, 2009.

HAMMER, G. L.; CARBERRY, P.; STONE, R. Comparing the value of seasonal climate forecasting systems in managing cropping systems. In: HAMMER, G. L.; NICHOLLS, N.; MITCHELL, C. (Eds.). **Applications of seasonal climate forecasting in agricultural and natural ecosystems** – The Australian Experience. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000. p. 183–195.

HEINEMANN, A. B.; HOOGENBOOM, G.; FARIA, R. T. de. Determination of spatial water requirements at country and regional levels using crop models and GIS. An example for the state of Parana, Brazil. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 52, n. 3, p. 177-196, 2002.

HOOGENBOOM, G. Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its applications. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 103, n. 2, p. 137–157, 2000.

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

JONES, C. A.; WEGENER, M. K.; RUSSELL, J. S.; MCLEOD, I. M.; WILLIAMS, J. R. **AUSCANE – Simulation of Australian sugarcane with EPIC**. CSIRO Australia: Division of Tropical Crops and Pastures. 1989. 29 p. (Technical Paper).

JOAQUIM, A. C.; BELLINASSO, I.; DONZELLI, J. L.; QUADROS, A. D.; BARATA, M. Q. S. Potencial e manejo de solos cultivados com cana-de-açúcar. In: SEMINÁRIO

COPERSUCAR DE TECNOLOGIA AGRONÔMICA, 6., 1994, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba, Centro de Tecnologia Copersucar, 1994. p. 1-10.

KEATING, B. A.; ROBERTSON, M. J.; MUCHOW, R. C.; HUTH, N. I. Modeling sugarcane production systems. Development and performance of the sugarcane module. **Field crops research**, Amsterdam, v. 61, n. 3, p. 253–271, 1999.

KOGAN, F.; KUSSUL, N.; ADAMENKO, T.; SKAKUN, S.; KRAVCHENKO, O.; KRYVOBOK, O.; SHELESTOV, A.; KOLOTII, A.; KUSSUL, O.; LAVRENYUK, A. Winter yield forecasting in Ukraine based on Earth observation, meteorological data and biophysical models. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Amsterdam, v. 23, p. 192-203, 2013.

LEITE, G. M. V.; ANDRADE, L. A. B.; GARCIA, J. C.; ANJOS, I. A. Efeitos de fontes e doses de silicato de cálcio no rendimento agrícola e na qualidade tecnológica da cana-de-açúcar, cultivar SP80-1816. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 4, p. 1.120-1.125, 2008.

LIU, D. L.; KINGSTON, G. Qcane: a simulation model of sugarcane growth and sugar accumulation. In: ROBERTSON, M. J. (Ed.). **Research and modelling approaches to assess sugarcane production opportunities and constraints**. St. Lucia: University of Queensland, 1995. p. 25-29.

MAGALHÃES, A. C. N. Ecofisiologia da cana-de-açúcar: aspectos do metabolismo do carbono da planta. In: CASTRO, P. R. C.; FERREIRA, S. O.; YAMADA, T. (Coords.). **Ecofisiologia da Produção**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa do Potássio e do Fósforo, 1987. p. 113-118.

MAULE, R. F.; MAZZA, J. A.; MARTHA JUNIOR, G. B. Produtividade agrícola de cultivares de cana-de-açúcar em diferentes solos e épocas de colheita. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 58, n. 2, p. 295-301, 2001.

MARIN, F. R.; JONES, J. W.; ROYCE, F.; SUGUITANI, C.; DONZELI, J. L.; PALLONE FILHO, W. J.; NASSIF, D. S. P. Parameterization and evaluation of predictions of DSSAT/CANEGRO for sugarcane Brazilian production systems. **Agronomy Journal**, Madison, v. 103, n. 2, p. 304-315, 2011.

MKHABELA, M. S.; MASHININI, N. N. Early maize yield forecasting in the four agro-ecological regions of Swaziland using NDVI data derived from NOAA's-AVHRR. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 129, n. 1-2, p.1-9, 2005.

MARTINÉ, J. F. **Modélisation de la production potentielle de la canne à sucre em zone tropicale, sous conditions thermiques et hydriques contrastées. Applications du modèle.** 2003. 131 f. Thèse (Docteur Agronomie) – Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris, 2003.

MORETO, V. B.; ROLIM, G. S. Estimation of annual yield and quality of “Valencia” orange related to monthly water deficiencies. **African Journal of Agricultural Research**, Addis Ababa, v. 10, n. 1, p. 543-553, 2015.

OLIVEIRA, H. F.; MANTOVANI, E. C.; SEDIYAMA, G. C. Avaliação de modelos de estimativa de produtividade da cana-de-açúcar irrigada em Jaíba-MG. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 7, n. 2, p. 112-127, 2013.

PEREIRA, G. M. **Simulação das perdas de água por evaporação e da uniformidade de distribuição na irrigação por aspersão.** 1992. 120 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1992.

PRADO, H. **Pedologia fácil aplicações na agricultura.** 2. ed. Piracicaba: Sem editora, 2008. 145 p.

REZENDE, M. **Pedologia base para distinção de ambientes.** 2. ed. Viçosa: UFV, 1997. 334 p.

SAVIN, I. Y.; STATHAKIS, D.; NEGRE, T.; ISAEV, V. A. Prediction of Crop Yields with the Use of Neural Networks. **Russian Agricultural Sciences**, New York, v. 33, n. 6, p. 361-363, 2007.

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

SCARPARI, M. S.; BEAUCLAIR, E. G. F. Physiological model to estimate the maturity of sugarcane. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 66, n. 5, p. 622-628, 2009.

SCHIMIDT, E. J.; GERS, C.; NARCISO, G.; FROST, P. Remote sensing in the south African Sugar Industry. In: INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGARCANE

TECHNOLOGISTS CONGRESS, 24., 2001, Brisbane. **Proceedings...** Brisbane: ASSCT, 2001. 1 CD-ROM.

SEGATO, S. V.; MATTIUZ, C. F. M.; MOZAMBANI, A. E. **Aspectos fenológicos da cana-de-açúcar**. 1. ed. Piracicaba: ESALQ/USP, 2006. p. 19-36.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4. ed. Porto Alegre: Artmed, 2009. 819 p.

THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, Hoboken, v. 38, n. 1, p. 55-94, 1948.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The Water Balance**. Centerton, New Jersey: Drexel Institute of Technology, Laboratory of Climatology, 1955. 104 p. (Publications in Climatology, v. 8, n. 1).

UNICA – **União da Indústria de Cana-de-açúcar**. 2012. Disponível em: <www.unica.com.br>. Acesso em: 18 nov. 2014.

VILLA NOVA, N. A.; PEDRO Jr. M. J.; PEREIRA, A. R.; OMETTO, J. C. **Estimativa de graus-dias acumulados acima de qualquer temperatura base, em função das temperaturas máxima e mínima**. São Paulo: Universidade de São Paulo – Instituto de Geografia, 1972. 8 p. (Caderno de Ciências da Terra, 30).

WALPOLE, R. E.; MYERS, R. H.; MYERS, S. L. **Probability and statistics for engineers and scientists**. 9. ed. Cambridge: Pearson Publishing, 2001. 816 p.