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

**Simulação estocástica de elementos do clima para estimação da
produtividade de cana planta**

Simone Toni Ruiz Corrêa

**Tese apresentada para obtenção do título de Doutora
em Ciências. Área de concentração: Fitotecnia**

**Piracicaba
2013**

Simone Toni Ruiz Corrêa
Engenheiro Agrônomo

**Simulação estocástica de elementos do clima para estimação da produtividade de cana
planta**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. DURVAL DOURADO NETO

**Tese apresentada para obtenção do título de Doutora
em Ciências. Área de concentração: Fitotecnia**

Piracicaba
2013

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

Corrêa, Simone Toni Ruiz

Simulação estocástica de elementos do clima para estimação da produtividade de cana planta / Simone Toni Ruiz Corrêa. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2013.
177 p: il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2013.

1. Distribuições de probabilidade 2. Modelo de crescimento e desenvolvimento de cultura 3. Curva de maturação I. Título

CDD 633.61
C824s

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

Dedico

À minha filha

Gabriele, pelo amor incondicional.

Ofereço

Ao meu marido ***Alexandre***, por estar sempre ao meu lado, sobretudo nos momentos mais difíceis... Minha gratidão eterna pelo apoio, compreensão e companheirismo durante essa jornada.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo milagre da VIDA.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” e ao Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, por terem me possibilitado o crescimento intelectual e profissional.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pela concessão de bolsa de estudo.

Ao Professor Dr. Durval Dourado Neto, pelo incentivo, inspiração e exemplo de profissional a ser seguido. Professor por excelência, muito obrigada pela amizade e orientação!

Ao Professor Dr. Ricardo Ferraz de Oliveira, por ter me acolhido no Laboratório de Fisiologia e Neurofisiologia Vegetal e, sobretudo, por despertar, em mim, a curiosidade e a inquietante vontade de aprender.

À Professora Dra. Selene Maria Coelho Loibel, por ter me recebido tão gentilmente no DEMAC-UNESP, pelas valiosas sugestões e correções neste trabalho.

Ao Professor Paulo César Sentelhas, pelos ensinamentos e apoio.

Aos Professores Edgar Gomes Ferreira de Beauclair e Valter Barbieri, pelos conselhos e oportunidades.

À amiga Natália Martins, por ter me mostrado o quão bonita pode ser a Estatística, pela disponibilidade em todos os momentos e pela sincera amizade.

Aos amigos Rafael Vivian e Fábio Scarpore que, mesmo à distância, estão sempre presentes com oportunas sugestões e incentivo.

Ao amigo Marcílio Nogueira do Amaral Gurgel, pela parceria e esclarecimentos.

Ao Professor Dr. Janilson Pinheiro de Assis (UFERSA) pela disponibilidade com que sempre me atendeu.

Aos colegas do Laboratório de Fisiologia e Neurofisiologia Vegetal, Rogério Lorençon, Francynês Macedo, Karla Vilaça, Adilson Nunes, Marina Gentil, Gabriel Danelluzi, Marcela Muller e Karina Lima e às funcionárias Eliana Nascimento e Eliane Lima pela convivência e carinho.

À amiga Luciane Lopes, pela extrema eficiência e postura de pró-atividade nas tarefas de apoio e condução da PPG-Fitotecnia.

À amiga Elisabete Sarkis, por ter me tratado sempre com tanta gentileza, pela prestatividade e competência.

À minha mãe, Marilene Ruiz, meu porto seguro de todas as horas, eterna fonte de inspiração e exemplo de conduta.

Ao meu pai, Ricardo Gustavo Ruiz (*in memorian*), por ter me ensinado, ainda tão cedo, o valor da honestidade, da retidão de caráter e a importância dos “estudos”.

Aos meus tios, Odette e Roberto Ruiz (*in memorian*), que mesmo distantes olham por mim.

Ao meu irmão, Eduardo Toni Ruiz, por ser, simplesmente, o meu “melhor amigo” e estar, sempre, ao meu lado.

À minha sobrinha Larissa, pelo exemplo de dedicação e superação; e a meu sobrinho Lucas, pela alegria e carinho.

À todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

Muito obrigada!

SUMÁRIO

RESUMO.....	9
ABSTRACT.....	11
LISTA DE FIGURAS.....	13
LISTA DE TABELAS.....	17
LISTA DE SÍMBOLOS.....	25
1 INTRODUÇÃO.....	27
2 OBJETIVOS.....	29
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	31
3.1 Aspectos da produção e qualidade da cana-de-açúcar.....	31
3.1.1 Fotossíntese e ciclo metabólico C_4	31
3.1.2 Translocação de fotoassimilados e a maturação.....	34
3.1.3 Área foliar e acúmulo de biomassa.....	35
3.1.4 Desenvolvimento fenológico e os ciclos da cana-de-açúcar.....	37
3.1.5 Fatores de qualidade, a remuneração da tonelada de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo e o planejamento de colheita.....	41
3.2 Elementos do clima condicionantes da produção de cana-de-açúcar.....	43
3.2.1 Temperatura do ar.....	44
3.2.2 Radiação solar.....	45
3.2.3 Disponibilidade hídrica do solo.....	46
3.3 Modelos, modelagem e simulação.....	47
3.3.1 Modelagem em agricultura.....	50
3.3.2 Componentes do processo de modelagem.....	52
3.3.3 Análise de desempenho dos modelos.....	53
3.3.4 A modelagem na cultura de cana-de-açúcar.....	54
3.3.5 Simulação estocástica pelo método de Monte Carlo.....	57
3.3.6 Caracterização dos elementos do clima.....	58
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	59
4.1 Obtenção das séries históricas dos dados meteorológicos.....	59
4.2 Teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov.....	59
4.3 Distribuições de probabilidade avaliadas para os elementos do clima.....	60
4.4 Processo de simulação - geração de números aleatórios e de variáveis aleatórias.....	66

4.5	Avaliação do processo de simulação.....	68
4.6	Descrição do modelo.....	70
4.6.1	Estimação da produtividade potencial.....	71
4.6.2	Estimação da produtividade deplecionada em função da disponibilidade hídrica.....	74
4.6.3	Estimação da Pol, do período útil de industrialização e da máxima produtividade de sacarose.....	77
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	87
5.1	Teste de aderência.....	87
5.2	Simulações.....	116
5.3	Modelo.....	136
5.3.1	Coeficiente de extinção luminosa (k , m^2 (solo) m^{-2} (folha)) e Índice de área foliar crítico (IAF_{cr} , $m^2 m^{-2}$).....	136
5.3.2	Eficiência do uso de radiação (EUR , $g MJ^{-1}$).....	138
5.3.3	Área foliar específica (AFE , $m^2 g^{-1}$).....	139
5.3.4	Temperaturas limítrofes para desenvolvimento da cultura ($^{\circ}C$) e Índice de área foliar inicial (IAF_i , $m^2 m^{-2}$).....	140
5.3.5	Soma térmica (ST_{em} , ST_{exp} , ST_{lin} , $ST_{mat-col}$, $^{\circ}C d$)	141
5.3.6	Taxa relativa de crescimento do IAF inicial (TRC_{IAF} , $(^{\circ}C d)^{-1}$).....	141
5.3.7	Coeficientes de partição de biomassa.....	141
5.3.8	Coeficiente de cultura (kc) e coeficiente de sensibilidade ao estresse hídrico (K_y).....	142
5.3.9	Abordagem determinística e estocástica.....	142
5.4	Considerações finais.....	155
6	CONCLUSÕES.....	159
	REFERÊNCIAS.....	161

RESUMO

Simulação estocástica de elementos do clima para estimação da produtividade de cana planta

Os modelos de simulação devem ser ajustados para que os valores dos parâmetros e variáveis de entrada forneçam resultados que melhor representem os valores observados. Assim, face às imprecisões a que estão sujeitos os resultados obtidos a partir do ajuste, há a necessidade de implementar métodos que permitam a avaliação das incertezas, quer seja nos parâmetros de cultura ou nas variáveis de entrada do modelo. Tem-se, para a cana-de-açúcar, que a máxima produtividade de açúcar ocorre no momento em que a Pol e a biomassa de colmos (TCH) são potencializados. Sendo assim, este trabalho objetivou: (i) testar a aderência de três distribuições de probabilidade (normal, gama e Weibull) aos dados diários de temperaturas média do ar e radiação solar global, em Piracicaba, SP; (ii) simular as variáveis temperatura do ar e radiação solar global por intermédio das distribuições normal bivariada, gama e Weibull, e a precipitação por intermédio da distribuição gama; (iii) propor um modelo, utilizando abordagem determinística para a variedade de interesse, para caracterizar a variação temporal do crescimento de biomassa seca de cana-de-açúcar e estimar a ordem de magnitude do período útil de industrialização (PUI), do dia de ocorrência do valor máximo da produtividade de sacarose (expressa em TPH) e das produtividades potencial e deplecionada de cana-de-açúcar, em dois ambientes de produção; (iv) estimar as variações das produtividades potencial, deplecionada por água e TPH (ciclo cana planta) por intermédio de procedimento estocástico para os elementos do clima (temperatura, radiação fotossinteticamente ativa e precipitação). As simulações utilizando as distribuições normal bivariada e gama são apropriadas por representarem melhor os elementos do clima; o modelo para a estimação das produtividades potencial, deplecionada e de sacarose apresentou resultados satisfatórios quanto aos objetivos propostos (abordagem determinística); o desempenho das variações das produtividades ocorreu de forma semelhante, no que se refere a magnitude de valores, para as simulações utilizando as distribuições normal bivariada e gama, e apresentou tendência de superestimar os valores das produtividades, para a simulação utilizando a distribuição Weibull (abordagem estocástica dos elementos do clima).

Palavras-chave: Distribuições de probabilidade; Modelo de crescimento e desenvolvimento de cultura; Curva de maturação

ABSTRACT

Stochastic simulation of climate elements to estimate the sugarcane productivity

Simulation models should be adjusted by values of parameters and input variables in order to provide results that best represent the observed values. Thus, due to inaccuracies that are subject the adjustment's results, it is necessary to implement methods for uncertainties evaluation for either, the parameters of the culture or input variables of the model. For the sugarcane, the maximum productivity of sugar occurs when both, Pol and biomass of stems (TCH) are the maximum. The aims of this study were: (i) to verify the adherence of three probability distributions (normal, gama and Weibull) to the daily data of average air temperature and solar radiation, in Piracicaba, SP; (ii) to simulate the variables air temperature and solar radiation through the bivariate normal, gama and Weibull distributions, and precipitation through the gama distribution; (iii) to propose a model, by using deterministic approach to the genotype of interest, to characterize the temporal variation in dry matter growth of sugarcane estimating the magnitude order of the useful period of industrialization, the date of occurrence in maximum sucrose yield (expressed by TPH) and the sugarcane potential and depleted productivity, in two production environments; (iv) to estimate the variability of potential, depleted by water and TPH (sugarcane plant cycle) through a stochastic procedure for the climate elements (temperature, photosynthetically active radiation and precipitation). The simulations by using bivariate normal and gama distributions are appropriate to better represent the climate elements; the model to estimate potential, depleted and sucrose productivity showed satisfactory results for the proposed objectives (deterministic approach); yield variability was similar, as regard the magnitude of values, for the simulations by using bivariate normal and gama distributions and it presented a tendency to overestimate the productivity for simulations by using Weibull distribution (stochastic approach of climate elements).

Keywords: Probability distribution; Crop growth and development model; Maturation curve

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Superfície de respostas da assimilação de CO ₂ para plantas C ₄ em função da radiação solar absorvida e da temperatura do ar (Adaptado de VAN HEEMST, 1986).....	33
Figura 2 –	Fases do desenvolvimento da cana-de-açúcar (Adaptado de DOORENBOS; KASSAM, 1979).....	37
Figura 3 –	Ciclo da cana de ano e meio e da cana de ano e variações de temperatura média e chuvas na região Centro-Sul. Fonte: Castro, 1999.....	40
Figura 4 –	Função densidade estimada ($f(x)$) (A) e função cumulativa estimada ($F(x)$) probabilidade acumulada) (B) da distribuição normal, para $N(23,6; 2,5)$ (Temperatura média do ar).....	61
Figura 5 –	Representação da distribuição normal bivariada para $N(\mu, \Sigma)$	63
Figura 6 –	Efeito da variação dos parâmetros β (escala) (A) e α (forma) (B) na função de distribuição gama.....	64
Figura 7 –	Função densidade estimada ($f(x)$) (A) e função cumulativa estimada ($F(x)$) probabilidade acumulada) (B) da distribuição gama, para $G(27,5; 1,6)$ (Temperatura média do ar).....	64
Figura 8 –	Função densidade estimada ($f(x)$) (A) e função cumulativa estimada ($F(x)$) probabilidade acumulada) (B) da distribuição Weibull, para $W(11,2; 24,2)$ (Temperatura média do ar).....	65
Figura 9 –	Variedade cultivada RB86-7515.....	71
Figura 10 –	Modelo $[p = a.t^2 + b.t^{1,5} + c.t + d.t^{0,5} + e]$ referente à curva de maturação de cana-de-açúcar, variedade cultivada RB86-7515 ($R^2=0,98356$; $R^2(\text{ajustado})=0,98309$; a (-0,031163809%), b (1,7018934%), c (-34,640126%), d (312,3068%) e e (-1043,0838%).....	77
Figura 11 –	Modelo referente à curva de maturação de cana-de-açúcar (p : Pol% cana. p_c : valor crítico de Pol – 12,257% {ordem de grandeza}. PUI : período útil de industrialização - colheita ocorre entre os momentos de valores de Pol superiores ao valor mínimo aceito $\{p_c\}$, que ocorre nos momentos 1 $\{t_i$: momento referente ao início do período de colheita} e 2 $\{t_f$: momento referente ao final do período de colheita}, para definir o início do período de colheita. PUI_o : período otimizado – colheita ocorre	

entre o momento de máxima produtividade de sacarose [momento 4 - qualquer momento entre os momentos 1 e 2] e máximo Pol [t_o] [momento 3]. p_M : valor máximo da Pol [%]. f: fração do valor máximo da Pol. PUI_m : período útil de industrialização com valores máximos da Pol)..... 83

- Figura 12 – Diagramas de dispersão referentes ao estudo da regressão linear simples, contendo o coeficiente de determinação (R^2), o índice de concordância de Willmott (d), índice de desempenho de Camargo (c), e coeficiente de correlação de Pearson (r) dos valores simulados em função dos valores observados de radiação solar (Qg) e temperatura média (T), para simulação normal bivariada, em Piracicaba, SP..... 129
- Figura 13 – Diagramas de dispersão referentes ao estudo da regressão linear simples, contendo o coeficiente de determinação (R^2), o índice de concordância de Willmott (d), índice de desempenho de Camargo (c), e coeficiente de correlação de Pearson (r) dos valores simulados em função dos valores observados de radiação solar (Qg) e temperatura média (T), para simulação gama, em Piracicaba, SP..... 130
- Figura 14 – Diagramas de dispersão referentes ao estudo da regressão linear simples, contendo o coeficiente de determinação (R^2), o índice de concordância de Willmott (d), índice de desempenho de Camargo (c), e coeficiente de correlação de Pearson (r) dos valores simulados em função dos valores observados de radiação solar (Qg) e temperatura média (T), para simulação Weibull, em Piracicaba, SP..... 131
- Figura 15 – (A) Histograma de frequência referente à distribuição do número de dias com precipitação durante o ano e (B) *Box plot* dos valores mensais de precipitação simulados utilizando a distribuição gama (1000 simulações diárias)..... 135
- Figura 16 – Representação da variabilidade temporal da precipitação (P, mm), evapotranspiração potencial (ETP, mm mês⁻¹), evapotranspiração da cultura (ETC, mm mês⁻¹) na safra 2005/2006 (A) e precipitação histórica (P hist, mm)..... 147

Figura 17 –	Histograma de frequência absoluta referente ao agrupamento de 1000 simulações de produtividades potencial (<i>PP</i>) e deplecionada (<i>PD</i>) (t ha^{-1}) simuladas por intermédio das distribuições normal bivariada (NB, caso 1), gama (caso 2) e Weibull (caso 3) para o cenário A.....	149
Figura 18 –	<i>Box plot</i> dos valores das produtividades potencial (<i>PP</i>) e deplecionada (<i>PD</i>) (t ha^{-1}) simulados por intermédio das distribuições normal bivariada (NB, caso 1), gama (G, caso 2) e Weibull (W, caso 3) (1000 simulações diárias) para o cenário A.....	150
Figura 19 –	<i>Box plot</i> dos valores da produtividade de sacarose (<i>TPH</i> , t ha^{-1}) no momento da colheita real (<i>I</i>) e na colheita ideal (2), simulados por intermédio das distribuições normal bivariada (NB, caso 1), gama (G, caso 2) e Weibull (W, caso 3) para o cenário A.....	150
Figura 20 –	Representação da variabilidade temporal da precipitação (<i>P</i> , mm), evapotranspiração potencial (<i>ETP</i> , mm mês^{-1}), evapotranspiração da cultura (<i>ETC</i> , mm mês^{-1}) na safra 2010/2011 (B) e precipitação histórica (<i>P hist</i> , mm).....	151
Figura 21 –	Histograma de frequência absoluta referente ao agrupamento de 1000 simulações de produtividades potencial (<i>PP</i>) e deplecionada (<i>PD</i>) (t ha^{-1}) simuladas por intermédio das distribuições normal bivariada (NB, caso 1), gama (caso 2) e Weibull (caso 3) para o cenário B.....	153
Figura 22 –	<i>Box plot</i> dos valores das produtividades potencial (<i>PP</i>) e deplecionada (<i>PD</i>) (t ha^{-1}) simulados por intermédio das distribuições normal bivariada (NB, caso 1), gama (G, caso 2) e Weibull (W, caso 3) (1000 simulações diárias) para o cenário B.....	154
Figura 23 –	<i>Box plot</i> dos valores da produtividade de sacarose (<i>TPH</i> , t ha^{-1}) no momento da colheita real (<i>I</i>) e na colheita ideal (2), simulados por intermédio das distribuições normal bivariada (NB, caso 1), gama (G, caso 2) e Weibull (W, caso 3) para o cenário B.....	154

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Valores das estimativas dos parâmetros média (μ) e desvio padrão (σ) para a distribuição normal, forma (α) e taxa (λ) para a distribuição gama e forma (α) e escala (β) para a distribuição Weibull, com seus respectivos “valor p” do teste de aderência (Kolmogorov-Smirnov). Valores referentes à análise estatística para a série histórica diária de temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$) em Piracicaba (SP). Série histórica: 94 anos, mês: Janeiro.....	90
Tabela 2 –	Valores das estimativas dos parâmetros média (μ) e desvio padrão (σ) para a distribuição normal, forma (α) e taxa (λ) para a distribuição gama e forma (α) e escala (β) para a distribuição Weibull, com seus respectivos “valor p” do teste de aderência (Kolmogorov-Smirnov). Valores referentes à análise estatística para a série histórica diária de temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$) em Piracicaba (SP). Série histórica: 94 anos, mês: Fevereiro.....	91
Tabela 3 –	Valores das estimativas dos parâmetros média (μ) e desvio padrão (σ) para a distribuição normal, forma (α) e taxa (λ) para a distribuição gama e forma (α) e escala (β) para a distribuição Weibull, com seus respectivos “valor p” do teste de aderência (Kolmogorov-Smirnov). Valores referentes à análise estatística para a série histórica diária de temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$) em Piracicaba (SP). Série histórica: 94 anos, mês: Março.....	92
Tabela 4 –	Valores das estimativas dos parâmetros média (μ) e desvio padrão (σ) para a distribuição normal, forma (α) e taxa (λ) para a distribuição gama e forma (α) e escala (β) para a distribuição Weibull, com seus respectivos “valor p” do teste de aderência (Kolmogorov-Smirnov). Valores referentes à análise estatística para a série histórica diária de temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$) em Piracicaba (SP). Série histórica: 94 anos, mês: Abril.....	93
Tabela 5 –	Valores das estimativas dos parâmetros média (μ) e desvio padrão (σ) para a distribuição normal, forma (α) e taxa (λ) para a distribuição gama e forma (α) e escala (β) para a distribuição Weibull, com seus respectivos “valor p” do teste de aderência (Kolmogorov-Smirnov). Valores referentes à análise estatística para a série histórica diária de temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$) em Piracicaba (SP). Série histórica: 94 anos, mês: Maio.....	94

Tabela 6 –	Valores das estimativas dos parâmetros média (μ) e desvio padrão (σ) para a distribuição normal, forma (α) e taxa (λ) para a distribuição gama e forma (α) e escala (β) para a distribuição Weibull, com seus respectivos “valor p” do teste de aderência (Kolmogorov-Smirnov). Valores referentes à análise estatística para a série histórica diária de temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$) em Piracicaba (SP). Série histórica: 94 anos, mês: Junho.....	95
Tabela 7 –	Valores das estimativas dos parâmetros média (μ) e desvio padrão (σ) para a distribuição normal, forma (α) e taxa (λ) para a distribuição gama e forma (α) e escala (β) para a distribuição Weibull, com seus respectivos “valor p” do teste de aderência (Kolmogorov-Smirnov). Valores referentes à análise estatística para a série histórica diária de temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$) em Piracicaba (SP). Série histórica: 94 anos, mês: Julho.....	96
Tabela 8 –	Valores das estimativas dos parâmetros média (μ) e desvio padrão (σ) para a distribuição normal, forma (α) e taxa (λ) para a distribuição gama e forma (α) e escala (β) para a distribuição Weibull, com seus respectivos “valor p” do teste de aderência (Kolmogorov-Smirnov). Valores referentes à análise estatística para a série histórica diária de temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$) em Piracicaba (SP). Série histórica: 94 anos, mês: Agosto.....	97
Tabela 9 –	Valores das estimativas dos parâmetros média (μ) e desvio padrão (σ) para a distribuição normal, forma (α) e taxa (λ) para a distribuição gama e forma (α) e escala (β) para a distribuição Weibull, com seus respectivos “valor p” do teste de aderência (Kolmogorov-Smirnov). Valores referentes à análise estatística para a série histórica diária de temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$) em Piracicaba (SP). Série histórica: 94 anos, mês: Setembro.....	98
Tabela 10 –	Valores das estimativas dos parâmetros média (μ) e desvio padrão (σ) para a distribuição normal, forma (α) e taxa (λ) para a distribuição gama e forma (α) e escala (β) para a distribuição Weibull, com seus respectivos “valor p” do teste de aderência (Kolmogorov-Smirnov). Valores referentes à análise estatística para a série histórica diária de temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$) em Piracicaba (SP). Série histórica: 94 anos, mês: Outubro.....	99
Tabela 11 –	Valores das estimativas dos parâmetros média (μ) e desvio padrão (σ) para a distribuição normal, forma (α) e taxa (λ) para a distribuição gama e forma (α) e escala (β) para a distribuição Weibull, com seus respectivos “valor p”	

	do teste de aderência (Kolmogorov-Smirnov). Valores referentes à análise estatística para a série histórica diária de temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$) em Piracicaba (SP). Série histórica: 94 anos, mês: Novembro.....	100
Tabela 12 –	Valores das estimativas dos parâmetros média (μ) e desvio padrão (σ) para a distribuição normal, forma (α) e taxa (λ) para a distribuição gama e forma (α) e escala (β) para a distribuição Weibull, com seus respectivos “valor p” do teste de aderência (Kolmogorov-Smirnov). Valores referentes à análise estatística para a série histórica diária de temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$) em Piracicaba (SP). Série histórica: 94 anos, mês: Dezembro.....	101
Tabela 13 –	Valores das estimativas dos parâmetros média (μ) e desvio padrão (σ) para a distribuição normal, forma (α) e taxa (λ) para a distribuição gama e forma (α) e escala (β) para a distribuição Weibull, com seus respectivos “valor p” do teste de aderência (Kolmogorov-Smirnov). Valores referentes à análise estatística para a série histórica diária de radiação solar global ($\text{cal cm}^{-2} \text{d}^{-1}$) em Piracicaba (SP). Série histórica: 31 anos, mês: Janeiro.....	104
Tabela 14 –	Valores das estimativas dos parâmetros média (μ) e desvio padrão (σ) para a distribuição normal, forma (α) e taxa (λ) para a distribuição gama e forma (α) e escala (β) para a distribuição Weibull, com seus respectivos “valor p” do teste de aderência (Kolmogorov-Smirnov). Valores referentes à análise estatística para a série histórica diária de radiação solar global ($\text{cal cm}^{-2} \text{d}^{-1}$) em Piracicaba (SP). Série histórica: 31 anos, mês: Fevereiro.....	105
Tabela 15 –	Valores das estimativas dos parâmetros média (μ) e desvio padrão (σ) para a distribuição normal, forma (α) e taxa (λ) para a distribuição gama e forma (α) e escala (β) para a distribuição Weibull, com seus respectivos “valor p” do teste de aderência (Kolmogorov-Smirnov). Valores referentes à análise estatística para a série histórica diária de radiação solar global ($\text{cal cm}^{-2} \text{d}^{-1}$) em Piracicaba (SP). Série histórica: 31 anos, mês: Março.....	106
Tabela 16 –	Valores das estimativas dos parâmetros média (μ) e desvio padrão (σ) para a distribuição normal, forma (α) e taxa (λ) para a distribuição gama e forma (α) e escala (β) para a distribuição Weibull, com seus respectivos “valor p” do teste de aderência (Kolmogorov-Smirnov). Valores referentes à análise estatística para a série histórica diária de radiação solar global ($\text{cal cm}^{-2} \text{d}^{-1}$) em Piracicaba (SP). Série histórica: 31 anos, mês: Abril.....	107

Tabela 17 –	Valores das estimativas dos parâmetros média (μ) e desvio padrão (σ) para a distribuição normal, forma (α) e taxa (λ) para a distribuição gama e forma (α) e escala (β) para a distribuição Weibull, com seus respectivos “valor p” do teste de aderência (Kolmogorov-Smirnov). Valores referentes à análise estatística para a série histórica diária de radiação solar global ($\text{cal cm}^{-2} \text{d}^{-1}$) em Piracicaba (SP). Série histórica: 31 anos, mês: Maio.....	108
Tabela 18–	Valores das estimativas dos parâmetros média (μ) e desvio padrão (σ) para a distribuição normal, forma (α) e taxa (λ) para a distribuição gama e forma (α) e escala (β) para a distribuição Weibull, com seus respectivos “valor p” do teste de aderência (Kolmogorov-Smirnov). Valores referentes à análise estatística para a série histórica diária de radiação solar global ($\text{cal cm}^{-2} \text{d}^{-1}$) em Piracicaba (SP). Série histórica: 31 anos, mês: Junho.....	109
Tabela 19–	Valores das estimativas dos parâmetros média (μ) e desvio padrão (σ) para a distribuição normal, forma (α) e taxa (λ) para a distribuição gama e forma (α) e escala (β) para a distribuição Weibull, com seus respectivos “valor p” do teste de aderência (Kolmogorov-Smirnov). Valores referentes à análise estatística para a série histórica diária de radiação solar global ($\text{cal cm}^{-2} \text{d}^{-1}$) em Piracicaba (SP). Série histórica: 31 anos, mês: Julho.....	110
Tabela 20–	Valores das estimativas dos parâmetros média (μ) e desvio padrão (σ) para a distribuição normal, forma (α) e taxa (λ) para a distribuição gama e forma (α) e escala (β) para a distribuição Weibull, com seus respectivos “valor p” do teste de aderência (Kolmogorov-Smirnov). Valores referentes à análise estatística para a série histórica diária de radiação solar global ($\text{cal cm}^{-2} \text{d}^{-1}$) em Piracicaba (SP). Série histórica: 31 anos, mês: Agosto.....	111
Tabela 21–	Valores das estimativas dos parâmetros média (μ) e desvio padrão (σ) para a distribuição normal, forma (α) e taxa (λ) para a distribuição gama e forma (α) e escala (β) para a distribuição Weibull, com seus respectivos “valor p” do teste de aderência (Kolmogorov-Smirnov). Valores referentes à análise estatística para a série histórica diária de radiação solar global ($\text{cal cm}^{-2} \text{d}^{-1}$) em Piracicaba (SP). Série histórica: 31 anos, mês: Setembro.....	112

Tabela 22–	Valores das estimativas dos parâmetros média (μ) e desvio padrão (σ) para a distribuição normal, forma (α) e taxa (λ) para a distribuição gama e forma (α) e escala (β) para a distribuição Weibull, com seus respectivos “valor p” do teste de aderência (Kolmogorov-Smirnov). Valores referentes à análise estatística para a série histórica diária de radiação solar global ($\text{cal cm}^{-2} \text{d}^{-1}$) em Piracicaba (SP). Série histórica: 31 anos, mês: Outubro.....	113
Tabela 23–	Valores das estimativas dos parâmetros média (μ) e desvio padrão (σ) para a distribuição normal, forma (α) e taxa (λ) para a distribuição gama e forma (α) e escala (β) para a distribuição Weibull, com seus respectivos “valor p” do teste de aderência (Kolmogorov-Smirnov). Valores referentes à análise estatística para a série histórica diária de radiação solar global ($\text{cal cm}^{-2} \text{d}^{-1}$) em Piracicaba (SP). Série histórica: 31 anos, mês: Novembro.....	114
Tabela 24–	Valores das estimativas dos parâmetros média (μ) e desvio padrão (σ) para a distribuição normal, forma (α) e taxa (λ) para a distribuição gama e forma (α) e escala (β) para a distribuição Weibull, com seus respectivos “valor p” do teste de aderência (Kolmogorov-Smirnov). Valores referentes à análise estatística para a série histórica diária de radiação solar global ($\text{cal cm}^{-2} \text{d}^{-1}$) em Piracicaba (SP). Série histórica: 31 anos, mês: Dezembro.....	115
Tabela 25–	Estimativas dos parâmetros originais das temperaturas média (μ), mínima (Mín) e máxima do ar (Máx), radiação solar média (μ), desvio padrão (σ) e observações limítrofes (Menor e Maior), covariância (COV) e correlação (r) entre as variáveis temperaturas média do ar ($^{\circ}\text{C}$) e radiação solar global ($\text{cal cm}^{-2} \text{d}^{-1}$), em Piracicaba (SP). Série histórica: 31 anos.....	118
Tabela 26–	Valores simulados médios das temperaturas média (μ), mínima (Mín) e máxima (Máx) do ar, em $^{\circ}\text{C}$, e seus respectivos valores de erro relativo percentual (ER) e desvio padrão (σ) obtidos por meio da distribuição normal bivariada, em Piracicaba, SP.....	120
Tabela 27–	Valores simulados médios das temperaturas média (μ) e máxima (Máx) do ar, em $^{\circ}\text{C}$, e seus respectivos valores de erro relativo percentual (ER) e desvio padrão (σ) obtidos por meio da distribuição gama, em Piracicaba, SP.....	121

Tabela 28–	Valores simulados médios das temperaturas média (μ) e máxima (Máx) do ar, em °C, e seus respectivos valores de erro relativo percentual (ER) e desvio padrão (σ) obtidos por meio da distribuição Weibull, em Piracicaba, SP.....	122
Tabela 29–	Valores simulados médios de radiação solar global média (μ), com seus respectivos valores limítrofes (Maior e Menor), em $\text{cal cm}^{-2} \text{d}^{-1}$, erro relativo percentual (ER) e desvio padrão (σ) da média para a simulação normal bivariada, em Piracicaba, SP.....	124
Tabela 30–	Valores simulados médios de radiação solar global média (μ), com seus respectivos valores limítrofes (Maior e Menor), em $\text{cal cm}^{-2} \text{d}^{-1}$, erro relativo percentual (ER) e desvio padrão (σ) da média para a simulação gama, em Piracicaba, SP.....	125
Tabela 31–	Valores simulados médios de radiação solar global média (μ), com seus respectivos valores limítrofes (Maior e Menor), em $\text{cal cm}^{-2} \text{d}^{-1}$, erro relativo percentual (ER) e desvio padrão (σ) da média para a simulação Weibull, em Piracicaba, SP.....	126
Tabela 32–	Resultado do teste <i>t</i> sintetizado por meio do “valor p” para as variáveis temperatura média do ar (°C) e radiação solar global ($\text{cal cm}^{-2} \text{d}^{-1}$) - comparação entre as médias real e simuladas por intermédio das distribuições normal bivariada (NB), gama e Weibull, em Piracicaba, SP....	133
Tabela 33–	Evolução temporal do acúmulo de biomassa seca de raízes (<i>BSR</i> , kg ha^{-1}), folhas (<i>BSF</i> , kg ha^{-1}) e colmos (<i>BSC</i> , kg ha^{-1}), período útil de industrialização (<i>PUI</i>), Pol (<i>p</i> , %), produtividade de sacarose com base na biomassa verde dos colmos (potencial - <i>TPH_p</i> e deplecionada - <i>TPH</i> , t ha^{-1}) e o indicativo da data ideal de colheita, comparada com a real. Valores simulados correspondentes ao último dia de cada mês - cenário A.....	143
Tabela 34–	Evolução temporal do acúmulo de biomassa seca de raízes (<i>BSR</i> , kg ha^{-1}), folhas (<i>BSF</i> , kg ha^{-1}) e colmos (<i>BSC</i> , kg ha^{-1}), período útil de industrialização (<i>PUI</i>), Pol (<i>p</i> , %), produtividade de sacarose com base na biomassa verde dos colmos (potencial - <i>TPH_p</i> e deplecionada - <i>TPH</i> , t ha^{-1}) e o indicativo da data ideal de colheita, comparada com a real. Valores simulados correspondentes ao último dia de cada mês - cenário B.....	145

Tabela 35–	Produtividades potencial e deplecionada de biomassa de colmos seca e verde (PP_s , PD_s , PP_u , e PD_u , $t\ ha^{-1}$), Pol (p , %), produtividade de sacarose (TPH , $t\ ha^{-1}$), nas datas de colheita real e ideal simuladas para os cenários (A e B) e produtividade real ($Preal$, $t\ ha^{-1}$).....	146
Tabela 36–	Percentis (P_5 e P_{95}) referentes à simulação de produtividade potencial (PP_u , $t\ ha^{-1}$), com base na alteração da eficiência do uso da radiação (EUR , $g\ MJ^{-1}$) realizada por intermédio da simulação normal bivariada - 100 simulações.....	157

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição
<i>AP</i>	Ambiente de produção
<i>AFE</i>	Área foliar específica, $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$
<i>a, b, c, d, e</i>	Parâmetros empíricos do modelo para cálculo da variação temporal de <i>p</i>
<i>BSR</i>	Biomassa seca de raízes, g m^{-2}
<i>BSF</i>	Biomassa seca de folhas, g m^{-2}
<i>BSC</i>	Biomassa seca de colmos, g m^{-2}
<i>CAD</i>	Capacidade de água disponível, mm
<i>CC</i>	Capacidade de campo, %
<i>CPR</i>	Coeficiente de partição de fotoassimilados para as raízes
<i>CPF</i>	Coeficiente de partição de fotoassimilados para as folhas
<i>CPC</i>	Coeficiente de partição de fotoassimilados para os colmos
<i>cIAF</i>	Taxa de crescimento foliar, d^{-1}
<i>DVF</i>	Desenvolvimento fenológico
<i>DVR</i>	Taxa de alteração no desenvolvimento fenológico, d^{-1}
μ	Média
σ	Desvio padrão
α	Parâmetro de forma
λ	Parâmetro de taxa ($1/\beta$)
β	Parâmetro de escala
<i>DEF</i>	Deficiência hídrica, mm
<i>EUR</i>	Eficiência no uso da radiação, g MJ^{-1}
<i>EXC</i>	Excedente hídrico, mm
<i>ET_p</i>	Evapotranspiração potencial, mm d^{-1}
<i>ET_r</i>	Evapotranspiração real, mm d^{-1}
<i>ET_c</i>	Evapotranspiração da cultura, mm d^{-1}
<i>f(x)</i>	Função densidade de probabilidade
<i>F(x)</i>	Função probabilidade acumulada
<i>I</i>	Índice térmico, °C
<i>IAFi</i>	Área foliar inicial (emergência), $\text{m}^2(\text{folha}) \text{m}^{-2}(\text{solo})$
<i>IAF</i>	Índice de área foliar, $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$
<i>IAFcr</i>	Índice de área foliar crítico, $\text{m}^2(\text{folha}) \text{m}^{-2}(\text{solo})$
<i>k</i>	Coeficiente de extinção luminosa, $\text{m}^2(\text{solo}) \text{m}^{-2}(\text{folha})$
<i>ky</i>	Coeficiente de sensibilidade ao estresse hídrico
<i>kc</i>	Coeficiente de cultura
<i>N</i>	Comprimento do dia, h d^{-1}
<i>P</i>	Precipitação pluvial, em mm
<i>PMP</i>	Ponto de murcha permanente, %

<i>PPs</i>	Produtividade potencial de biomassa seca de colmos (BSC), kg ha ⁻¹
<i>PPu</i>	Produtividade potencial de biomassa verde de colmos, kg ha ⁻¹
<i>PDs</i>	Produtividade deplecionada de BSC, kg ha ⁻¹
<i>PDu</i>	Produtividade deplecionada de biomassa verde de colmos, kg ha ⁻¹ (TCH)
<i>p</i>	Pol% de cana (PCC%) - porcentagem aparente de sacarose na cana, %
<i>pc</i>	Valor crítico da Pol (12,257%)
<i>pm</i>	Valor máximo estimado da Pol, %
<i>PUI</i>	Período útil de industrialização
<i>PUIo</i>	Período útil de industrialização que maximiza a produtividade de açúcar
<i>Qg</i>	Radiação solar global. 1 cal cm ⁻² d ⁻¹ = 41868 J m ⁻² d ⁻¹ (SI) (Fonte: www.ipemsp.com.br)
<i>RFA_{int}</i>	Radiação fotossinteticamente ativa interceptada, MJ m ⁻² d ⁻¹
<i>sIAF</i>	Taxa de senescência foliar, d ⁻¹
<i>STem</i>	Soma térmica do plantio até a emergência, °C d
<i>STexp</i>	Soma térmica durante o crescimento vegetativo (exponencial), °C d
<i>STlin</i>	Soma térmica durante o crescimento vegetativo (linear), °C d
<i>STI</i>	Soma térmica durante o crescimento vegetativo - total, °C d
<i>STmat-col</i>	Soma térmica do início da maturação até a colheita, °C d (<i>ST2</i>)
<i>T</i>	Temperatura média do ar, em °C
<i>Tbi</i>	Temperatura basal inferior, °C
<i>Tbs</i>	Temperatura basal superior, °C
<i>Toi</i>	Temperatura ótima inferior, °C
<i>Tos</i>	Temperatura ótima superior, °C
<i>TPH</i>	Tonelada de Pol por hectare (produto entre TCH e <i>p</i> /100) – produtividade de sacarose
<i>TCH</i>	Tonelada de colmos por hectare (PDu)
<i>TRC_{IAF}</i>	Taxa relativa de crescimento do IAF inicial, (°C d) ⁻¹
<i>TEF</i>	Temperatura efetiva, °C
<i>TRMF</i>	Taxa relativa de mortalidade das folhas, d ⁻¹
<i>TRMFs</i>	Taxa relativa de mortalidade das folhas em função do sombreamento, d ⁻¹
<i>TRMFid</i>	Taxa relativa de mortalidade das folhas em função da idade, d ⁻¹
<i>TBST</i>	Taxa de acúmulo de biomassa seca total, g m ⁻² d ⁻¹
<i>TBR</i>	Taxa de acúmulo de biomassa seca de raízes, g m ⁻² d ⁻¹
<i>TBF</i>	Taxa de acúmulo de biomassa seca de folhas, g m ⁻² d ⁻¹
<i>TBC</i>	Taxa de acúmulo de biomassa seca de colmos, g m ⁻² d ⁻¹
<i>valor p</i>	Ou nível descritivo. Probabilidade de se obter uma estatística de teste igual ou mais extrema quanto aquela observada em uma amostra, assumindo verdadeira a hipótese nula (H ₀), para determinado nível de significância α
<i>z</i>	Profundidade do sistema radicular, cm

1 INTRODUÇÃO

Poucos setores apresentam, na atualidade, tamanha expressividade econômica e social como a cadeia produtiva da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.). Quase quinhentos anos após sua introdução no Brasil e desconsiderados alguns reflexos em determinados períodos históricos, a cana-de-açúcar é uma das principais culturas do país, quer seja pela sua múltipla utilização, pelo status de produto agrícola com maior safra no país ou por ser, hoje, uma das principais atividades em termos de balança comercial e geração de empregos.

O cenário atual e perspectivas para o futuro nunca foram tão promissoras, embasadas em fatores como: (i) condições meteorológicas favoráveis, disponibilidade de terra, baixo custo de produção, emprego de tecnologia de ponta na lavoura e na indústria sucroenergética; (ii) decisão da Organização Mundial do Comércio (OMC) de condenar a União Européia (UE) pelos subsídios concedidos à exportação de açúcar excedente produzido e reexportação de açúcar importado de países beneficiados pela isenção de tarifas de importação e; (iii) aumento da demanda mundial por energia renovável. Neste sentido, destacam-se as recentes preocupações com a redução da emissão dos gases de efeito estufa, bem como o aumento dos preços dos combustíveis e as incertezas das reservas de petróleo, que vêm despertando o interesse pela exploração de culturas que possam se constituir em fontes de energia renovável (KOSGEI et al., 2007; SU; LEE, 2009).

De acordo com o terceiro levantamento da safra 2011/2012 de cana-de-açúcar realizada pela Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2011), a atual produção brasileira deverá atingir o montante de 571,5 milhões de toneladas, com área plantada estimada em 8.368,4 mil hectares e, portanto, a produtividade média dos canaviais está estimada em 68,3 toneladas por hectare. A região Sudeste é a principal produtora de cana-de-açúcar correspondendo, em área, a 62,4% do total e o estado de São Paulo o principal produtor, com produção estimada de 308 milhões de toneladas.

O acúmulo de biomassa e o rendimento de açúcar podem ser influenciados por vários fatores inerentes ao sistema de produção e ao ambiente de cultivo (TEJERA et al., 2007). Clima é um dos principais fatores determinantes da produtividade agrícola conduzindo diversos estudos com o intuito de relacionar parâmetros climáticos com a produtividade das culturas (SINGELS et al., 2005). Tem-se, para a cana-de-açúcar, que a máxima produtividade de açúcar ocorre no momento em que a Pol e biomassa de colmos são potencializados (valores máximos).

Dada a natureza variável do processo de produção e considerando grandes extensões territoriais a serem explorados, os recursos financeiros e tempo destinados à execução e à condução de experimentos, muitas vezes, se tornam inviáveis. Nesse contexto, o uso de modelos de simulação possibilita a criação de cenários alternativos e assume fundamental importância como ferramenta de assistência à tomada de decisões para viabilizar sistemas racionais de produção (MEINKE; HOCHMAN, 2000; VAN ITTERSUM et al., 2003).

Os modelos envolvendo a cultura de cana-de-açúcar e desenvolvidos por centros de pesquisa internacionais têm encontrado, aqui, amplo campo de desenvolvimento. Quanto aos modelos desenvolvidos em nosso país, apesar das importantes pesquisas dos últimos 40 anos, poucos são aqueles que de fato são aplicados como ferramentas de gestão a auxílio no planejamento do plantio e da colheita.

Ressalta-se, também, que existem restrições que devem ser consideradas quando se faz o uso de modelos matemáticos, de uma forma geral. Os modelos de simulação de crescimento e desenvolvimento de culturas, por exemplo, devem ser ajustados para que os valores dos parâmetros de cultura e variáveis de entrada forneçam os resultados que melhor representem os valores observados. Assim, face às imprecisões a que estão sujeitos os resultados obtidos a partir do ajuste, há a necessidade de implementar métodos que permitam a avaliação das incertezas, quer seja nos parâmetros de cultura ou nas variáveis de entrada do modelo.

Portanto, como hipóteses basilares deste trabalho tem-se que: (i) o procedimento estocástico aplicado aos elementos do clima é o mais adequado para estimar as variações das produtividades em função da inserção do risco (incerteza); (ii) é possível estabelecer a curva de crescimento (variação temporal da produção por unidade de área de raiz, folha e colmo) correspondente à produtividade potencial (PP de colmos) em função da latitude, época de plantio, temperatura do ar, radiação fotossinteticamente ativa e parâmetros empíricos de caracterização da variedade cultivada em questão (RB867515); (iii) é possível estimar a produtividade deplecionada por água (e nutrientes) em função da PP de colmos e balanço hídrico (parâmetros de sensibilidade do genótipo ao estresse) e determinar o período útil de industrialização (PUI) em função do valor crítico da Pol% e; (iv) é possível determinar a data ideal de colheita que maximiza a produtividade de açúcar.

2 OBJETIVOS

Com o intuito de propor metodologias para abordar a simulação estocástica e modelos de crescimento e desenvolvimento de culturas, o presente trabalho objetivou:

- (i) Testar a aderência de três distribuições de probabilidade (normal, gama e Weibull) aos dados diários de temperaturas média do ar e radiação solar global, em Piracicaba, SP;
- (ii) Simular os parâmetros temperaturas do ar (média, mínima e máxima) e radiação solar global por intermédio das distribuições normal bivariada, gama e Weibull, e o parâmetro precipitação por intermédio da distribuição gama;
- (iii) Propor um modelo, por intermédio de abordagem determinística e para a variedade de interesse (genótipo), para caracterizar a variação temporal do crescimento de biomassa de cana-de-açúcar e estimar a ordem de magnitude do período útil de industrialização (PUI), do dia de ocorrência do valor máximo da produtividade de sacarose e das produtividades potencial e deplecionada por água, visando auxiliar o planejamento do plantio e da colheita de cana-de-açúcar, tendo como base a caracterização da curva de maturação (variação temporal da Pol% cana) para a variedade de interesse e em dois ambientes de produção;
- (iv) Por intermédio de procedimento estocástico para os elementos do clima (temperatura, radiação fotossinteticamente ativa e precipitação), estimar as variações das produtividades de sacarose, potencial e deplecionada de cana-de-açúcar (ciclo cana planta).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Aspectos da produção e qualidade da cana-de-açúcar

Toda e qualquer produção vegetal que visa rentabilidade econômica fundamenta-se no conhecimento da cultura quanto a sua fisiologia (funcionalidade da espécie), fenologia (sucessivas etapas do desenvolvimento da cultura) e, por fim, a ecofisiologia (interações com o ambiente em que se encontra). Sendo assim, o pleno entendimento sobre os aspectos que envolvem a produção da cultura em questão é fundamental para os pesquisadores que buscam, de alguma forma, modelar, simular ou prever desempenho e resultados.

3.1.1 Fotossíntese e ciclo metabólico C₄

A fotossíntese consiste em dois processos acoplados: um de caráter fotoquímico, que compreende a absorção de luz e o transporte de elétrons; e o outro bioquímico, com a captação do dióxido de carbono (CO₂) e a formação de compostos que encadeiam os átomos de carbono (C), retendo a energia absorvida a partir da luz nas ligações químicas das moléculas formadas.

O processo de oxirredução da água e a energia luminosa absorvida pela clorofila originam o transporte de elétrons que, por sua vez, gera O₂ e energia química - acumulada nas moléculas de ATP e NADPH (poder redutor). Esta é a etapa fotoquímica da fotossíntese, também conhecida como reação luminosa, e ocorre na membrana dos tilacóides dos cloroplastos. A energia produzida nesta fase é, então, usada nas reações de redução do CO₂ a carboidratos, que ocorrem no estroma (fase solúvel dos cloroplastos). Essas reações ocorrem durante o dia, visto algumas enzimas envolvidas no processo requererem a ativação pela luz, e compreendem a etapa bioquímica da fotossíntese (BUCHANAN et al., 2000).

O processo de fixação do carbono é catalisado pela enzima Rubisco (ribulose 1,5-bifosfato carboxilase/oxigenase) e produz um composto de três carbonos (ácido 3-fosfoglicérico ou 3-PGA), como primeiro produto estável da conversão de CO₂ em carboidrato. No ciclo de Calvin-Benson, CO₂ e água do ambiente são combinados com uma molécula aceptora contendo 5 átomos de carbono (ribulose 1,5-bifosfato), catalisada pela enzima Rubisco. O produto desta reação são duas moléculas de 3-fosfoglicerato, ou 3-PGA e glicerato, que é reduzido a carboidrato (gliceraldeído-3-fosfato), utilizando o ATP e NADPH gerados fotoquimicamente. O ciclo é completado pela regeneração necessária do acceptor

ribulose 1,5-bifosfato, em função da absorção contínua do CO_2 (RAVEN, 2007). Este processo, funcionalmente bastante estudado, ocorre em muitas plantas cultivadas e é referido como via C_3 . Embora a Rubisco esteja presente em todas as plantas, nos anos 1960s foram identificadas várias espécies, como a cana-de-açúcar e o milho, que apresentam um sistema complementar a esta via, chamado de via C_4 . Hatch e Slack (1966) foram os primeiros pesquisadores a observar esta rota de fixação do CO_2 em cana-de-açúcar, elucidando o que hoje conhecemos como ciclo fotossintético C_4 do carbono.

Nas células do mesofilo foliar da cana-de-açúcar, compostos ácidos de quatro carbonos são os primeiros intermediários estáveis detectáveis da fotossíntese. Estes ácidos são obtidos pela fixação do CO_2 realizada por meio do fosfoenolpiruvato (PEP), com a ajuda da enzima Fosfoenolpiruvatocarboxilase (PEP-Case), resultando na formação de ácido oxalacético que é reduzido a malato pelo NADPH (processo de carboxilação). O malato, então, é translocado para a bainha do feixe vascular, onde ocorre a descarboxilação, gerando CO_2 - que é fixado pela Rubisco e reduzido a carboidrato via ciclo de Calvin-Benson, como visto no parágrafo anterior - e ácido C_3 (piruvato), que é transportado para as células do mesofilo, onde o acceptor original de CO_2 , fosfoenolpiruvato, é regenerado (VON CAEMMERER, 2000; SAGE, 2004). Hatch e Slack só puderam formular este modelo quando concluíram que a enzima Fosfoenolpiruvatocarboxilase (PEP-Case) é restrita às células do mesofilo, enquanto a Rubisco está confinada às células da bainha dos feixes vasculares (TAIZ; ZEIGER, 2004).

O metabolismo fotossintético C_4 é caracterizado por uma série de adaptações anatômicas e bioquímicas capazes de concentrar CO_2 ao redor do sítio de carboxilação da Rubisco, permitindo a essas plantas apresentar fotorrespiração reduzida (MAROCCO et al., 1998), maior eficiência do uso da água e de nutrientes e, portanto, maior potencial produtivo (VON CAEMMERER; FURBANK, 2003; SAGE, 2004). A anatomia “Kranz” é a principal modificação anatômica, pois, as células do mesofilo se organizam ao redor das células da bainha do feixe vascular em forma de “coroa” (*Kranz*, em alemão). Quanto às alterações bioquímicas já vistas, destacam-se a enzima PEP-Case para formação do ácido oxalacético, e outras enzimas, para concentrar o CO_2 nos sítios de carboxilação (LEEGOOD, 2002).

Algumas vantagens das plantas C_4 : (i) as taxas de absorção de CO_2 são muito mais altas, pois esse “sistema” pode armazenar mais carbono de forma intermediária mantendo, assim, o estômato menos aberto, evitando a perda de água (TAIZ; ZEIGER, 2004). Em outras

palavras, a grande afinidade da enzima PEP-case pelo substrato HCO_3^- , que por sua vez não compete com o O_2 , permite que as plantas C_4 fotossintetizem com pequena abertura estomática e, conseqüentemente, com baixa perda de água; (ii) as plantas C_4 , em relação às C_3 , possuem maior temperatura ótima para fotossíntese e crescimento (KIM et al., 2007), condição frequente nos ambientes onde se cultiva cana-de-açúcar.

A taxa de fotossíntese nas C_4 , de maneira geral, aumenta com a temperatura até 30°C estabiliza-se entre 30 e 34°C e decresce em temperaturas mais elevadas. Quando a temperatura do ar decresce de 23 para 14°C há uma queda de 84% na taxa de fotossíntese. Esta diminuição está, provavelmente, associada à diminuição da síntese de PEP-case, fotodestruição de clorofila e diminuição na velocidade das reações de carboxilação (CASTRO et al., 2008). O fato de as plantas C_4 lidarem melhor com temperaturas mais altas também permite que seus sistemas de captação de luz possam suportar intensidades luminosas maiores.

Considerando-se o exposto acima, o rendimento fotossintético da planta representa a interação entre a resposta fotossintética de folhas individuais com a disponibilidade de luz que incide sobre elas. A eficiência de conversão desta radiação pelas plantas depende, dentre outros fatores, principalmente da temperatura, do estado nutricional e do equilíbrio hídrico das plantas. Portanto, a radiação fotossinteticamente ativa (RFA) e a temperatura são parâmetros moduladores fundamentais para a assimilação de dióxido de carbono (CO_2) pelas plantas, conforme Figura 1.

Figura 1 - Superfície de respostas da assimilação de CO_2 para plantas C_4 em função da radiação solar absorvida e da temperatura do ar (Adaptado de VAN HEEMST, 1986)

3.1.2 Translocação de fotoassimilados e a maturação

Entende-se por translocação o termo adotado por alguns autores para incluir todos os movimentos a longas distâncias dos compostos no interior do floema e xilema. Aqui, de acordo com o uso geral, emprega-se o termo para descrever o transporte multidirecional que ocorre no floema.

Sendo assim, é sabido que a partir do gliceraldeído-3-fosfato gerado pelo ciclo de Calvin-Benson são sintetizados o amido e a sacarose. O primeiro, sintetizado no cloroplasto, é uma reserva estável e insolúvel de carboidrato presente em quase todas as plantas. Já a sacarose - sintetizada no citosol - é a forma transportável de carbono e energia na maioria das plantas (TAIZ; ZEIGER, 2004).

Os fatores que proporcionam variações do acúmulo de sacarose no colmo não são totalmente elucidados, sendo ora relacionados à *fonte*, ora ao *dreno* (dimensão e quantidade). Sabe-se, porém, que a partição de açúcares para as células, organelas e tecidos é determinada por pontos de controle na rota de transporte dos carboidratos (RAE et al., 2005). A destinação do carbono para formação de amido ou de sacarose parece ser controlada, em parte, pela taxa de síntese de sacarose, em nível de *dreno* (WATT et al., 2005).

Durante o processo de fotossíntese, parte da sacarose produzida é, principalmente, estocada no vacúolo das folhas, e parte é exportada para outras regiões da planta. A transferência de sacarose das folhas (*fonte*) para o elemento de tubo crivado do floema é realizada, geralmente, através dos plasmodesmos (CASTRO; CHRISTOFFOLETI, 2005). Devido aos gradientes de pressão hidrostática (diferença de potencial), ocorre o fluxo governado por pressão da solução de sacarose da zona de produção para a região de consumo, através de elementos de tubo crivados do floema (FLOSS, 2004).

Segundo Marin et al. (2009), no decorrer do desenvolvimento vegetativo e sob condições climáticas adequadas, os processos fisiológicos da cana-de-açúcar não estimulam o acúmulo de sacarose; ao contrário, estimulam a planta a continuar seu desenvolvimento utilizando, para isso, os fotoassimilados produzidos. Quando - além da programação genética - as condições ambientais restringem o desenvolvimento vegetativo, estimula-se o acúmulo de sacarose e inicia-se a fase de maturação.

A maturação é um dos aspectos mais importantes da cultura da cana-de-açúcar pois está diretamente relacionado com o momento de industrialização. Durante a fase de maturação, o terço basal do colmo mostra teor mais elevado de açúcar do que o terço médio, e este maior do que o terço apical (FERNANDES; BENDA, 1985). À medida que a maturação

progride, o teor de sacarose tende a se igualar nas diversas partes dos colmos, quando o ápice apresenta composição similar à da base. Em um colmo maduro, portanto, todo o internódio tem concentração semelhante de sacarose.

Na região Sudeste do Brasil, o processo de maturação ocorre naturalmente a partir de abril/maio, atingindo seu clímax nos meses de setembro/outubro. As condições climáticas dessa região, com a gradativa queda da temperatura e a diminuição das precipitações no meio do ano, são as determinantes desse processo (GHELLER, 2001).

De acordo com Azevedo (1981), durante a vida da planta a porcentagem de umidade diminui gradualmente, baixando de 83 para 71%. As curvas de variação da umidade e do teor de sacarose em função do tempo são a imagem ótima, uma da outra. A diminuição da temperatura tem efeito direto na absorção de nutrientes e, quando reduzida, diminui o desenvolvimento vegetativo e a maior parte dos açúcares produzidos é armazenada. Quando a umidade do solo diminui, há a redução do teor de água nos tecidos da planta, e a desidratação força a conversão dos açúcares redutores em sacarose.

Scarpari e Beauclair (2004) reportam um efeito combinado de redução de temperatura e da precipitação como responsável pela diminuição no ritmo vegetativo, sem afetar significativamente o processo fotossintético, e pelo acúmulo de sacarose nos colmos. Quando essa redução não é reportada, necessariamente deve ocorrer uma seca moderada para ocasionar a redução da elongação do internódio, resultando no aumento do teor de sacarose nos colmos.

3.1.3 Área foliar e acúmulo de biomassa

A dinâmica foliar é crucial na produtividade da cultura, uma vez que o baixo desenvolvimento foliar pode limitar expressivamente o rendimento da cana-de-açúcar, devido à redução da interceptação de radiação solar e do acúmulo de biomassa pelas plantas (SINCLAIR et al., 2004). Quanto mais rápido o crescimento das folhas e maior o período em que elas permanecerem ativas, maior deverá ser o desenvolvimento da cultura (SUGUITANI, 2006).

Ressalta-se que a produção fotossintética não aumenta indefinidamente com o índice de área foliar (IAF, $\text{m}^2(\text{folha}) \text{m}^{-2}(\text{solo})$), sendo limitada pelo autosombreamento. Após o IAF ter atingido valor suficiente para interceptar aproximadamente toda a radiação fotossinteticamente ativa (RFA), maiores aumentos neste índice podem apresentar dois tipos de curvas de resposta na taxa de produção fotossintética: uma parabólica, indicando um IAF

ótimo; outra assintótica, sem IAF ótimo (BERNARDES, 1987), onde se enquadra a maioria das culturas (MACHADO et al., 1985). Segundo Nickell (1977), a cana-de-açúcar apresenta ambas as respostas, dependendo do material analisado. Tanto o nível crítico quanto o ótimo situam-se em torno de um valor que proporcione, aproximadamente, 95% de interceptação de luz, o que, segundo Machado et al. (1985), corresponde a um IAF próximo de 4.

A intensidade de crescimento foliar na fase inicial do desenvolvimento da cana-de-açúcar é o fator mais importante na taxa de crescimento e na biomassa acumulada (MACHADO et al., 1982), tendo, portanto, preferência na partição da matéria seca da parte aérea em relação aos colmos. Segundo Machado (1987), a área foliar individual aumenta inicialmente mais em função do aumento do comprimento da folha e posteriormente em função apenas da largura. Isto acontece porque no início a planta busca ocupar rapidamente a área da linha e entrelinha, e depois disso o aumento da largura ocorre como uma forma de otimizar a ocupação do espaço entre perfilhos.

No que diz respeito aos estudos envolvendo produção de biomassa em cana-de-açúcar, deve-se observar que os intervalos de tempo encontrados dependerão, sobremaneira, da época em que se dá o início do ciclo, se é cana planta ou soqueiras, bem como das condições climáticas correntes.

A curva de crescimento da cana-de-açúcar, a exemplo de outras culturas, apresenta a forma sigmoide (começa lentamente, aumenta de modo exponencial durante certo tempo, e depois se nivela, à medida que a população atinge os limites de algum recurso disponível), provavelmente sem influência varietal (MACHADO, 1981). Machado et al. (1982) dividiram o crescimento da parte aérea da cana-de-açúcar (ciclo ano e meio) cultivada na região centro-sul em três etapas: fase inicial, em que o crescimento é lento, que vai de março a outubro; fase de crescimento rápido, de outubro a maio, que é quando 75% da biomassa total é acumulada, e fase final de crescimento lento, de maio a agosto, que corresponde a 11% da biomassa total. Este mesmo autor encontrou, em estudo datado de 1981, uma taxa máxima de crescimento para a cana-de-açúcar de $25 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, no período de 300 a 400 dias após o plantio, sendo a taxa média de crescimento em torno de $12 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Bull e Glasziou (1975), citados por Barbieri (1993), encontraram o valor de $40 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ para a taxa máxima de crescimento, mas isto em condições excepcionais, com a produtividade de colmos atingindo 150 t ha^{-1} . Na Austrália, Muchow et al. (1994) obtiveram uma taxa de crescimento semelhante, da ordem de $41,1 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ obtidos na fase linear.

Gava et al. (2001), também dividiram o ciclo da cana em três fases e verificaram que, na primeira fase de desenvolvimento, 0 a 60 dias após a colheita (DAC), o crescimento foi lento e os perfilhos acumularam cerca de 6% da matéria seca total da parte aérea. Na segunda fase, 61 a 210 DAC, a planta apresentou taxa de crescimento elevado e acumulou aproximadamente 81% da matéria seca total. Na terceira fase, 211 a 299 DAC, que é a fase da maturação, houve um acúmulo de matéria seca em torno de 13%.

Miocque (1999), acompanhando o crescimento mensal das variedades mais produtivas selecionadas no respectivo ano nos canaviais comerciais de uma empresa na região de Araraquara, SP, encontrou maior taxa de crescimento no mês de janeiro em 80% dos anos. Ele sugeriu esse mês como referência para possíveis previsões para início de safra (abril a maio) e para tanto, adicionaria 30% ao acumulado até então, quando em condições não tão favoráveis ao desenvolvimento, ou 40%, quando em condições climáticas favoráveis.

3.1.4 Desenvolvimento fenológico e os ciclos da cana-de-açúcar

Entende-se por fenologia o estudo das sucessivas etapas do desenvolvimento da cultura ao longo do tempo. Representa, portanto, o entendimento de como a planta se desenvolve no decorrer de suas diferentes fases e pode ser dividida, para a cultura da cana-de-açúcar, em: (i) emergência; (ii) estabelecimento da cultura; (iii) desenvolvimento e (iv) maturação, conforme mostra a Figura 2.

Figura 2 - Fases do desenvolvimento da cana-de-açúcar (Adaptado de DOORENBOS; KASSAM, 1979)

Normalmente, em cultivos comerciais, a cana-de-açúcar é propagada assexuadamente por meio de pedaços de colmos, os toletes, com 2 a 3 gemas, os quais podem ser: “toletes de ponta”, denominados “toletes sementes”, ou os toletes de colmos mais maduros (CASTRO et al., 2008). O seccionamento da muda em toletes visa eliminar a dominância apical proeminente em colmos maduros com 11 meses ou mais de idade, exercida pela gema do ápice que, por meio da produção e manutenção de um fluxo basípeto (do ápice para a base) de auxina, inibe a brotação das gemas laterais, mantendo-as em estado de dormência.

Após o plantio, e sob condições ambientais favoráveis, inicia-se o entumescimento das gemas. Algumas células reiniciam sua atividade meristemática, desenvolvendo-se num pequeno broto que emerge pelo poro da gema em direção à superfície do solo (colmo primário). Simultaneamente, meristemas dos primórdios radiculares, também em atividade, dão início ao desenvolvimento das raízes do tolete (CÂMARA, 1993). Após determinado estágio de desenvolvimento, as gemas localizadas na base do colmo primário se intumescem, originando novas brotações que se dirigem à superfície do solo. A fase de brotação é bastante influenciada pela qualidade da muda, ambiente de produção, época e manejo do plantio (RIPOLI et al., 2006).

Segundo Castro et al. (2008) existem variedades cuja emergência é rápida, em outros mais tardia; alguns em que as gemas brotam antes das raízes, em outros o contrário - características essas de ordem genética e que poderiam, também, sofrer influências das condições edafoclimáticas. Dentro da mesma variedade, a brotação varia de acordo com a idade da muda, diferença da idade da gema, grau de umidade do tolete, concentração de açúcares e nutrientes minerais, sendo que algumas variedades apresentam baixa brotação a partir do tolete, mas mostram ótimos resultados na brotação da soqueira (SEGATO et al., 2006).

As soqueiras da cana-de-açúcar têm um desenvolvimento semelhante ao observado na cana plantada, com diferenças específicas no processo de enraizamento e brotação da soca e, principalmente, com queda de produtividade em relação à cana-planta devido, sobretudo, à compactação do solo, queda de fertilidade do solo sob uso contínuo de cana e a utilização ineficiente de fertilizantes (MARIN et al., 2009).

A fase seguinte à brotação é chamada de perfilhamento, sendo governado inicialmente pela temperatura e radiação; porém também é afetado pela variedade, densidade de plantio, ciclo (cana planta ou cana soca) e disponibilidade de água e de nitrogênio no solo. A cana-de-açúcar perfilha nos primeiros meses após o plantio ou a rebrota, e esse perfilhamento

intensifica-se à medida que as condições de temperatura e disponibilidade hídrica são favorecidas. Após este período, o número de perfilhos diminui até se estabilizar (SUGUITANI; MATSUOKA, 2001).

Segundo Segato et al. (2006), no momento de máximo perfilhamento, algumas variedades de cana-de-açúcar podem ter 25 ou mais colmos por touceira. Para Câmara (1993), a partir deste momento de máximo perfilhamento a competição entre os perfilhos pelos fatores de crescimento (nutrientes, luz, espaço e água) torna-se elevada, de maneira que se constata a redução do perfilhamento por meio da diminuição e paralisação deste processo, além da morte dos perfilhos mais jovens.

Durante o desenvolvimento vegetativo, destaca-se a elongação e crescimento em espessura dos colmos. Diminuindo a drenagem fisiológica constituída pelos jovens perfilhos que pereceram devido à competição, inicia-se o processo de acúmulo de sacarose nos internódios basais dos colmos mais velhos, como consequência da produção excedente de fotoassimilados.

A fase de maturação normalmente se inicia a partir de 270 DAP (para a cana de ano cultivada na região centro-sul do Brasil), com cerca de 2 a 4 meses de duração (RODRIGUES, 1995), sendo que neste período, clima seco e irradiância solar menos intensa (temperatura do ar amena) não favorecem o crescimento da cultura. À medida que vão amadurecendo, os colmos que sobreviveram à competição da fase de perfilhamento continuam crescendo e acumulando cada vez mais sacarose nos entrenós que, ao atingir seu tamanho final, acabam se tornando colmos industrializáveis, passando a acumular de forma mais intensa a sacarose (SEGATO et al., 2006). Como regra geral, cada variedade ao alcançar a maturação máxima deve ser colhida, caso contrário, seu teor de sacarose declinará.

O ciclo da cana plantada pela primeira vez oriunda de partes vegetativas e que receberá o primeiro corte recebe o nome de ciclo da cana planta. Devido às condições do clima predominantes no centro-sul do Brasil, o plantio da cana-de-açúcar geralmente é realizado em duas épocas distintas, proporcionando cultivos conhecidos como “cana de ano” e “cana de ano e meio” (CARVALHO, 2009). Há, ainda, uma terceira terminologia: a “cana de inverno”.

No primeiro caso (cana de ano) o plantio normalmente ocorre entre setembro e novembro, no início da estação chuvosa, com colheita após um ciclo médio de 12 meses. Neste sistema, o canavial apresenta máxima taxa de crescimento entre novembro e abril em virtude do longo fotoperíodo, alta temperatura e disponibilidade hídrica, diminuindo após esse

período devido às condições climáticas adversas. Tem-se, então, aproximadamente 8 meses de desenvolvimento vegetativo e 4 meses para ocorrer a maturação (SEGATO et al., 2006).

Já para a cana de ano e meio o plantio ocorre entre janeiro e abril (no meio da estação chuvosa e quente) até maio, sendo a colheita realizada entre os meses de maio a novembro do ano seguinte, dependendo da época de maturação da variedade utilizada, permanecendo, em média, de 14 a 18 meses no campo. Neste sistema, após seu estabelecimento, o canavial passa por um período de repouso durante seu primeiro inverno, sendo cortado no inverno do ano seguinte (MARIN et al., 2009). De acordo com Segato et al. (2006), assim como na cana de ano, o período de maior crescimento da cana de ano e meio também vai de novembro a abril, mas o canavial atinge este período mais desenvolvido, sendo capaz de responder - em crescimento vegetativo - mais rapidamente às condições ambientais favoráveis à cultura.

Cana de inverno é a estabelecida a partir do final de maio a agosto e é assim designada por desenvolver-se em período de ocorrência de menores temperaturas. A disponibilidade de água é sua maior limitação, contudo, apresenta menor período de utilização da terra (12-14 meses), em média, com produtividades elevadas, bastante próximas às produtividades obtidas com o plantio de cana de ano e meio. Tanto a cana de ano e meio como a cana de inverno, quando a chegada das chuvas, estão germinadas e perfilhadas e, portanto, prontas para um rápido desenvolvimento nos meses de maior temperatura e precipitação (VITTI; MAZZA, 2002).

Os ciclos da cultura de cana-de-açúcar acima mencionados bem como as variações de temperatura média do ar e chuvas na região Centro-Sul são apresentados na Figura 3.

Figura 3 – Ciclo da cana de ano e meio e da cana de ano e variações de temperatura média e chuvas na região Centro-Sul. Fonte: Castro, 1999

Em termos da época de colheita, considera-se que as canas a serem colhidas nos meses de abril, maio e junho são precoces; canas a serem colhidas em julho, agosto e setembro são consideradas de ciclo médio e as colhidas em outubro e novembro são consideradas tardias. A colheita de cana-de-açúcar no período correto (no pico da maturidade) é necessária para conseguir um peso máximo de colmos para a moagem, tendo sido produzidos com as menores perdas possíveis sob um dado ambiente de crescimento (SEGATO et al., 2006).

3.1.5 Fatores de qualidade, a remuneração da tonelada de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo e o planejamento de colheita

De acordo com Ripoli e Ripoli (2004), os principais fatores relacionados à qualidade da cana-de-açúcar são Pol (sacarose aparente), pureza, ATR (açúcares redutores totais), teor de açúcares redutores, percentagem de fibra e tempo de queima e corte, conforme definições abaixo:

Pol (p , %): teor de sacarose aparente na cana e que, portanto, varia durante a safra. Para a indústria canavieira, quanto mais elevados os teores de sacarose, melhor. Para os autores, materiais com valores superiores a 14% são aptos, em termos de qualidade, à industrialização.

Pureza: é determinada pela relação ($p/\text{Brix}.100$). Quanto maior a pureza da cana, melhor a qualidade da matéria-prima para se recuperar açúcar. Todas as substâncias que apresentam atividade óptica podem interferir na Pol, como açúcares redutores (glicose e frutose), polissacarídeos e algumas proteínas;

ATR (Açúcares Redutores Totais): indicador que representa a quantidade total de açúcares da cana (sacarose, glicose e frutose). O ATR é determinado pela relação $p/0,95$ mais o teor de açúcares redutores. A concentração de açúcares na cana varia, em geral, dentro da faixa de 13,0 a 17,5%. Entretanto, é importante lembrar que canas muito ricas e com baixa percentagem de fibras estão mais sujeitas a danos físicos e ataque de pragas e microrganismos;

Açúcares redutores: é a quantidade de glicose e de frutose presentes na cana, que afetam diretamente a sua pureza, já que refletem em uma menor eficiência na recuperação da sacarose pela fábrica;

Porcentagem da fibra da cana: reflete na eficiência da extração da moenda, ou seja, quanto mais alta a fibra da cana, menor será a eficiência de extração. Por outro lado, é necessário considerar que variedades de cana com baixos teores de fibra são mais susceptíveis a danos

mecânicos ocasionados no corte e transporte, o que favorece a contaminação e as perdas na indústria;

Tempo de queima/corte: é o tempo entre a queima do canavial e a sua moagem na indústria (no caso da colheita manual) ou o tempo entre o corte mecanizado e a moagem. Quanto menor o tempo entre a queima/corte da cana e a moagem, menor será o efeito de atividades microbianas nos colmos que ocorrem e melhor será a qualidade da matéria-prima entregue à indústria. Além de afetar a eficiência dos processos de produção de açúcar e álcool, o tempo de queima/corte também afeta a qualidade dos produtos finais e o desempenho dos processos.

Em relação à remuneração, até 17 de agosto de 1982 o Brasil, maior produtor mundial de cana-de-açúcar, açúcar e álcool, ainda utilizava o antigo método de pagamento por peso. Somente a partir desta data que o Ato 25, publicado no Diário Oficial da União, estabeleceu que todas as usinas e destilarias com mais de três anos de funcionamento, a partir do ano-safra 1983/84, teriam que pagar a cana aos fornecedores pelo teor de sacarose (Pagamento de Cana pelo Teor de Sacaroses - PCTS). Quando da entrega dos carregamentos na unidade industrial eram feitas as análises e determinado o preço da tonelada de cana. O governo fixava o preço da cana, o qual poderia ter um ágio caso a cana entregue apresentasse uma qualidade superior à cana padrão do estado e, um deságio, caso a cana entregue apresentasse uma qualidade inferior à cana padrão do estado (SACHS, 2007).

Segundo a mesma autora, a cana padrão era determinada pela Comissão Regional de Pagamento de Cana pelo Teor de Sacarose de cada estado, que era composta por representantes dos fornecedores de cana, dos industriais e do Instituto do Açúcar e do Alcool (IAA). No caso do Estado de São Paulo, uma tonelada de cana padrão continha 122,57 kg de sacarose por tonelada, o que equivalia a uma Pol% cana (PC%, teor de sacarose contida na cana) de 12,257% e a pureza do caldo igual a 83,87%. Quanto maior a pureza do caldo da cana, melhor a sua qualidade. Portanto, só se conseguia preço melhor para as canas mais ricas, isto é, para as que apresentassem PC% superior a 12,257% e pureza do caldo acima de 83,87%.

Em 1997 foi constituído um grupo técnico e econômico formado por representantes dos produtores de cana, indicados pela Organização dos Plantadores de Cana da Região Centro-Sul do Brasil (ORPLANA) e por representantes do setor industrial, indicados pela União da Agroindústria do Açúcar e do Alcool do Estado de São Paulo (UNICA), formando assim o Conselho dos Produtores de Cana-de-açúcar, Açúcar e Alcool do Estado de São Paulo (CONSECANA- SP). A principal atribuição desse grupo foi o desenvolvimento de um novo

sistema de pagamento pela qualidade de cana entregue pelos produtores às unidades industriais denominado Sistema de Remuneração da Tonelada de Cana pela Qualidade/CONSECANA.

Nesse sistema, o valor da cana-de-açúcar se baseia no ATR (concentração total de açúcares recuperáveis no processo industrial) contido em uma tonelada de cana e nos preços do açúcar e etanol vendidos pelas usinas nos mercados interno e externo. O ATR é determinado, também, pelo *mix* de produção de cada unidade industrial, ou seja, a quantidade produzida de açúcar e álcool, e pela participação da matéria-prima nos custos de produção do açúcar e do álcool (CONSECANA, 2006). Adotado pelas unidades produtoras desde o ano-safra 1998/99, esse método consiste em um conjunto de regras de “livre adoção”, empregadas para o cálculo do preço da tonelada da cana-de-açúcar durante o ano-safra.

A produção de cana-de-açúcar visando à sua industrialização é um enorme desafio ante os inúmeros fatores de produção, de ambiente e de mercado em que o setor está inserido (BEAUCLAIR, 2004). Nesse tocante, é importante implementar um planejamento “estratégico” da colheita que busque otimizar o retorno econômico da cultura baseado no conceito de máxima concentração de sacarose nos colmos, ou seja, considerando não só a máxima produção mas, também, a época mais propícia para a colheita (pico de maturação).

A elaboração de um planejamento estratégico deve envolver os diferentes setores da empresa, ou seja, a integração entre a área agrícola, industrial, comercial e financeira. A complexidade do problema torna sua solução dependente de modernos recursos de Pesquisa Operacional, como modelos de gestão que, entretanto, são extremamente dependentes da capacidade de construir estimativas e cenários confiáveis (BEAUCLAIR, 2004).

Assim, modelos de previsão da qualidade da matéria-prima são ferramentas importantes na lavoura canavieira, objetivando suprir estimativas de rendimento ao longo dos meses de safra, visando à caracterização das alternativas de manejo, aumentando a eficácia das decisões gerenciais e estratégicas (SCARPARI; BEAUCLAIR, 2004).

3.2 Elementos do clima condicionantes da produção de cana-de-açúcar

Vários trabalhos têm sido conduzidos para estudar a influência do clima na produtividade da cana-de-açúcar (OMETTO, 1980; BARBIERI, 1993; DIAS et al., 1999; MUCHOW et al., 1994; SCARPARI; BEAUCLAIR, 2004). Sendo assim, nos itens que se seguem são abordados os principais elementos climáticos condicionantes da produção desta cultura.

3.2.1 Temperatura do ar

O desenvolvimento da cana-de-açúcar está diretamente relacionado com a temperatura ambiente, sendo este um dos elementos climáticos mais importantes no contexto da produção, havendo grande número de publicações sugerindo limites térmicos para a cultura (MARIN et al., 2009).

De modo geral, admite-se que a taxa de crescimento da cana-de-açúcar apresente queda expressiva sempre que a temperatura do ar cai abaixo de 16°C e, contrariamente, taxas máximas são obtidas quando a cultura é submetida a temperaturas entre 30 e 34°C, passando a ocorrer estresse térmico sob condições de temperatura superior a 35°C, com crescimento praticamente nulo acima dos 38°C (CASTRO et al., 2008; ARGENTON, 2006; DOOREMBOS; KASSAM, 1994; CASAGRANDE, 1991).

Nickell (1977) demonstrou que, na brotação de gemas, a faixa ideal de temperatura do ar está entre 34 e 37°C, sendo os extremos, abaixo de 21°C e acima de 44°C limitantes.

Para Marin et al. (2009), quanto à formação e o crescimento dos perfilhos, os valores de 20 e 30°C são tidos como limites inferior e superior para o bom desenvolvimento da cultura - valores estes similares aos observados por Penning de Vries et al. (1989) no estudo da melhor faixa de temperatura para que a atividade fotossintética se mantivesse em condições ótimas.

Em relação à temperatura basal, verifica-se na Literatura específica grande inconsistência quanto a seus valores. Para dados obtidos em ambiente controlado a temperatura basal é frequentemente calculada da relação linear entre um período de desenvolvimento e do intervalo de temperatura testado; no campo, a determinação dos parâmetros térmicos é ainda mais complicada porque não há temperatura constante na qual a taxa de crescimento possa ser relacionada diretamente (LIU; KINGSTON; BULL, 1998).

Alguns pesquisadores, como Inman-Bamber (1994) e Robertson e Donaldson (1998), reportaram ser este um valor entre 8 e 15°C. Barbieri et al. (1979) determinaram, em condições de campo, que a temperatura basal para a cana-de-açúcar é de aproximadamente 20°C. Uma possível explicação para esta estimativa incompatível da temperatura basal é que em condições de campo, temperaturas mínimas ou máximas diárias ultrapassam o valor da temperatura basal. Nestas condições, os métodos existentes influenciam normalmente o acúmulo da soma térmica (LIU; KINGSTON; BULL, 1998). Amplitudes térmicas diárias geram temperaturas máximas e mínimas distintas ao longo do período, entretanto podem gerar a mesma temperatura média. Este fato pode interferir na determinação da temperatura basal,

gerando valores distintos para um mesmo local. Outro agravante na determinação da temperatura basal é o processo de aclimação ao frio desenvolvido pelas plantas. Numerosos efeitos fisiológicos e bioquímicos ocorrem modificando a sensibilidade das plantas às baixas temperaturas e, por consequência, o crescimento pode ou não ser interrompido (XIN; BROWSE, 2000).

Na fase de maturação são desejáveis temperaturas relativamente baixas, que variem entre 10 e 20°C, clima seco e ensolarado, pois, dessa maneira, há significativa redução na taxa de crescimento vegetativo e na elevação do teor de sacarose na cana (DOORENBOS; KASSAM, 1994).

3.2.2 Radiação solar

A radiação solar é um dos elementos que mais limitam o crescimento e desenvolvimento das plantas (TAIZ; ZEIGER, 2004), uma vez que origina toda a energia necessária para a transformação do CO₂ atmosférico em energia metabólica.

A radiação solar que chega até a superfície terrestre pode ser separada em duas fases, uma quando a radiação é direta e a outra difusa, que é refletida ou espalhada por nuvens e por partículas e aerossóis presentes na atmosfera (GOUDRIAAN; VAN LAAR, 1994). Cada uma dessas fases pode ser dividida mais duas vezes, sendo a primeira de baixo comprimento de onda (inferior a 3000 nm) e a segunda é a radiação térmica (superior a 3000 nm). Quando se analisa em separado a radiação de baixo comprimento de onda, esta é separada, também, em bandas que possuem diferentes efeitos sobre as plantas. A faixa da radiação visível varia de 400 a 700 nm, e são especialmente estudadas na área agrônômica, devido ser radiação fotossinteticamente ativa (RFA) (KUBINS, 1971).

A razão entre a RFA e a radiação solar é estimada entre 0,44 e 0,45 quando o sol está mais de 30° acima do horizonte, sem contar com a radiação difusa e, por outro lado, quando a elevação solar excede 40°, a razão estimada entre a RFA e a radiação total é 0,6, mas considerando a contribuição difusa. Combinando radiação difusa e direta em proporções apropriadas, a razão entre a RFA e a radiação solar é próxima de 0,5 (SINCLAIR; MUCHOW, 1999) - bem adaptada aos trópicos, segundo Ometto (1981). Desta RFA incidente, em média 10% é refletida e 10% transmitida através das folhas, sendo o restante absorvido (LOVENSTEIN et al., 1995). Apenas 5% da energia total que incide na superfície terrestre é aproveitada pelas plantas para formação de carboidratos, o restante é emitida em

comprimentos de ondas maiores, perdida na forma de calor e refletida (TAIZ; ZEIGER, 2004).

A radiação solar afeta de forma diferente cada fase da cultura. Na fase de desenvolvimento vegetativo há diversos eventos dependentes da radiação. O perfilhamento é favorecido pela radiação solar intensa, sob condições de alta intensidade luminosa e durante os períodos em que o IAF é relativamente baixo. Com o desenvolvimento foliar, a extinção de radiação na folhagem torna-se mais intensa e a competição por luz se acentua, exigindo um reequilíbrio entre a quantidade de energia radiante recebida e o número de perfilhos que poderão sobreviver.

Inman-Bamber (1994), na África do Sul, verificou que o tempo para a primeira soqueira alcançar 70% de interceptação da radiação RFA é afetado significativamente pela data de plantio. Canaviais plantados no inverno, por exemplo, levaram de duas a três vezes mais tempo para alcançar a interceptação de 70% desta radiação do que as áreas iniciadas no verão. Verificou-se, também, que a segunda soqueira conseguiu atingir este patamar de interceptação mais cedo do que a primeira soqueira, iniciadas no mesmo ano e na mesma data.

Uma característica que oferece boa eficiência de captação de energia solar é a distribuição do ângulo de inserção das folhas, que pode ser representada na forma do coeficiente de extinção da radiação solar (k). Este, por sua vez, é função da arquitetura do dossel e do ângulo zenital do sol (MARIN et al., 2009). Muchow et al. (1994) encontrou valor médio do coeficiente de extinção de luz no dossel da cana-de-açúcar em cerca de 0,38, em cultivo na Austrália, o que corresponde a um ângulo médio de inserção de folhas variando entre 67° e 68°. Esta característica tende a elevar a extinção de radiação sob ângulos zenitais maiores, minimizando a absorção de radiação nos momentos mais quentes do dia, quando outros fatores tendem a ser mais restritivos que a radiação.

3.2.3 Disponibilidade hídrica do solo

Os efeitos do *deficit* hídrico dependem de sua intensidade, duração e época de ocorrência, bem como da interação com outros fatores determinantes da expressão da produtividade final (FONTANA et al., 2001).

Deficits hídricos moderados provocaram redução na área foliar e no acúmulo de biomassa, porém com um pequeno impacto no rendimento final devido ao pouco tempo de exposição e a habilidade da planta em produzir folhas e colmos em condições úmidas subsequentes (WIEDENFELD, 2000). *Deficit* hídrico severo, quando o dossel já está bem

formado, ocasiona um impacto maior na produtividade de colmos e de sacarose, apresentando reduções significativas na concentração de açúcar apenas quando a biomassa do colmo cai abaixo de 50% daquela do controle sem *deficit* hídrico (ROBERTSON et al., 1999).

Scarpari e Beauclair (2004) relataram que uma seca superior a 130 mm nos meses que antecedem a colheita, já afeta o acúmulo de sacarose no colmo. Inman-Bamber (2004) concluiu que o acúmulo de biomassa é fortemente reduzido com deficiência hídrica superior a 120 mm anuais e o acúmulo de sacarose no colmo é afetado com deficiência hídrica superior a 145 mm anuais (ARGENTON, 2006).

De acordo com Doorenbos e Kassam (1994), o requerimento hídrico da cana-de-açúcar oscila entre 1500 mm e 2500 mm. Pacheco et al. (1983) observaram valores de evapotranspiração acumulada para a cana-de-açúcar entre 1600 mm e 1800 mm, na província de Matanzas, em Cuba; 1420 mm a 1650 mm, em Porto Rico; 1936 mm, na Argentina. Porém, estes valores tendem a diminuir com o ciclo da cultura (cana planta, primeira soca e segunda soca).

Souza et al. (1999), em cultivo de cana soca irrigada com idade de 13 meses, encontraram para as variedades cultivadas RB72454, RB76418 e SP70-1011, máximas produtividades em colmos da ordem de 155,8, 126,9 e 141,9 t ha⁻¹, com lâminas de água de 1568, 1424 e 1589 mm, respectivamente.

Farias et al. (2008), avaliando a eficiência do uso de água da cana-de-açúcar cultivada na região dos Tabuleiros Costeiros do município de Capim, PB, verificaram que a maximização do uso eficiente de água para a variedade SP79-1011 pode ser obtida com a lâmina de 1276 mm.

Maule et al. (2001) verificaram no estado de São Paulo, para a variedade cultivada SP79-1011 com produtividades médias de 149, 154 e 170 t ha⁻¹, precipitações totais de 1478, 1695 e 1829 mm, para ciclos de 14, 17 e 19 meses, respectivamente. Azevedo (2002) encontrou, para a mesma variedade, cultivada nos tabuleiros costeiros da Paraíba, produtividades de 52, 79, 93 e 92 t ha⁻¹, para uma precipitação efetiva mais irrigação de 609, 761, 905 e 1043 mm, respectivamente, durante 12 meses de cultivo.

3.3 Modelos, modelagem e simulação

Para que os resultados das pesquisas realizadas nas mais diversas áreas sejam confiáveis, existe a necessidade da realização de experimentos que envolvem custo de instalação, manutenção e obtenção dos dados, além do tempo necessário para a condução dos

mesmos. Em muitos casos, não existe a possibilidade de instalação de experimentos, exigindo-se que a tomada decisória seja rápida. Para contornar situações como estas, propõem-se a descrição de um sistema (simplificação da realidade), na escala do objetivo do estudo e com a interpretação dos fenômenos envolvidos correlacionada ao nível de exatidão obtida na sua descrição. Para que esta “simplificação” seja possível, faz-se necessário um elevado conhecimento dos conceitos básicos de funcionamento do sistema em questão (RUIZ-CORRÊA, 2011). Sendo assim, conceitua-se como modelagem a ferramenta científica baseada na representação simplificada de um fragmento de sistema que, na maioria dos casos, pode ser composta por um conjunto de símbolos e relações matemáticas logicamente ordenadas (modelos).

Essa representação dos modelos, também conhecida como simulação, apresenta vantagens como: (i) estabelece “diagnósticos de funcionamento” de um ou mais processos, ou seja, facilita o estudo de variáveis, procedimentos e fluxos sem alterar o mundo real; (ii) o tempo pode ser comprimido ou expandido, permitindo acelerar ou retardar o fenômeno sob investigação; (iii) identifica “carências científicas” a serem exploradas. O uso de modelos permite obter um conhecimento integrado das suas partes, em diferentes escalas espaciais e temporais, estabelecendo diretrizes e testando hipóteses assumidas sobre o sistema real.

Há diversas classificações propostas para diferenciar os modelos. Uma delas os divide em conceitual, físico e matemático (ACOCK; ACOCK, 1991).

Os modelos conceituais possibilitam uma visão holística do problema e o relacionam, de forma clara, às várias áreas de conhecimento envolvidas na sua descrição. Os requisitos básicos para sua elaboração são: conhecimento amplo do assunto, clareza e objetividade da finalidade da elaboração do modelo e da definição das variáveis a serem representadas (PESSOA et al., 1997). Os modelos físicos são raramente usados em sistemas biológicos, dada sua característica rígida, respeitando as condições em que sua proposta foi formulada. O modelo é tido como matemático quando é possível a descrição do desempenho de um sistema por meio de equações matemáticas. Eles podem ser classificados sob diversas formas, porém, as principais são: (i) modelos empíricos; (ii) modelos mecanísticos e; (iii) modelos estocásticos.

Modelos empíricos, também chamados de modelos estatísticos, são aqueles que se baseiam puramente em dados observados, fundamentando-se em relações derivadas a partir de análise de Regressões. Não há muito interesse em explicar “o porquê” o sistema responde de tal forma. Nesse tipo de modelo utilizam-se dados empíricos, variáveis ou constantes

consagradas que fazem parte do conhecimento de determinada ciência. Apesar da ressalva de extrapolação sem ajustes para diferentes condições daquelas de sua origem, segundo Rimmington e Charles-Edwards (1987), um modelo obtido por análise de regressão, quando baseado no entendimento de processos de desenvolvimento de um sistema, por exemplo, pode ser mais valioso que um complexo modelo mecanístico, baseado somente no conhecimento de suas respostas.

Modelos mecanísticos, também conhecidos como modelos explanatórios, são aqueles que têm sua estrutura baseada na descrição dos processos que ocorrem no sistema considerado, ou seja, existe a tentativa de se considerar os princípios físicos, químicos e biológicos que ocorrem no sistema (causa-efeito), tentando entendê-los em termos dos mecanismos presentes. Tais modelos apresentam dificuldades na obtenção dos dados necessários para o seu desenvolvimento; por outro lado, apresentam pouca restrição à extrapolação espacial dos resultados, quando comparados ao modelo anterior. São os mais versáteis dentre os tipos de modelos matemáticos (PAUTIAN et al., 1992).

Modelos estocásticos, ou probabilísticos, são aqueles que possuem ao menos uma de suas características operacionais dada por uma função de probabilidade, ou seja, são modelos que contém algum elemento que varie ao acaso (THORNLEY, 1976). Para as situações onde as variáveis de interesse podem apresentar-se extremamente variáveis quanto a seus valores, como, por exemplo, a temperatura média de determinada localidade, o procedimento estocástico vem a contemplar as incertezas, fazendo possível que não só um único valor seja admitido como resposta final, mas sim, várias possibilidades - cada uma associada à determinada probabilidade de ocorrência.

Neste tipo de abordagem, as variáveis utilizadas são descritas por uma função de probabilidade $f(x)$, ou seja, uma função que associa os valores da variável em questão X com a probabilidade de cada um deles ocorrer. Quando conhecemos todos os valores de uma variável aleatória, juntamente com suas respectivas probabilidades, temos uma distribuição de probabilidades ($F(X)$). Dessa forma, os modelos probabilísticos, ou estocásticos, são expressões que envolvem variáveis, parâmetros e constantes matemáticas, juntamente com um ou mais componentes aleatórios resultantes de flutuações imprevisíveis dos dados de observação ou da experimentação (GOMES; GARCIA, 2002).

Na realidade, a maioria dos modelos de simulação é uma mistura de empiricismo e mecanicidade. Mesmo os mais mecanísticos dos modelos usam empiricismo em algum nível hierárquico de sua estrutura (BOOTE et al., 1996). Um modelo que simula a produtividade de

uma cultura pode ser mecanístico quando representa as relações envolvidas no desenvolvimento da planta; porém, ele será empírico em um nível “anterior”, como por exemplo, na variação da taxa fotossintética bruta de acordo com a temperatura.

Ao contrário do que podemos observar em segmentos da física ou da engenharia, não existe um modelo certo ou errado para o uso em agricultura, mas sim modelos com diversos graus de aplicação para diversas circunstâncias. Deve ser ressaltado que todos os modelos são abstrações e, portanto, o grau permitido dessas abstrações deve ser feito no contexto dos objetivos. O equilíbrio entre o realismo e a abstração na reprodução do sistema é a chave da efetiva modelagem (SANTOS, 1986). Portanto, os profissionais que trabalham com essas ferramentas devem definir claramente seus objetivos antes de pensar em construí-los, enquanto que os usuários devem escolher aqueles que melhor resolvam suas necessidades específicas (THORNLEY; JOHNSON, 1990; DOURADO et al., 1998).

3.3.1 Modelagem em agricultura

O uso de modelos na agricultura é datado desde os primeiros cultivos na história da humanidade. Naquele tempo era sabido que, ao plantar determinada cultura em determinada época e modo, seu desenvolvimento ocorreria de tal forma que a colheita se daria em outra época. Esse modelo mental foi sendo aprimorado pelos agricultores com o passar dos tempos, baseado nas suas próprias experiências.

A utilização de modelos objetivando quantificar os efeitos das variáveis ambientais no crescimento e desenvolvimento das culturas vem ocorrendo há quase três séculos. Quando Réaumur, em 1735, fez a associação entre temperatura e o desenvolvimento de culturas, ele estava propondo um dos modelos empíricos mais eficientes que se conhece em agrometeorologia, baseado no acúmulo de graus-dia. A partir da década de 50, trabalhos mais elaborados vieram formalizar o que seria o alicerce da modelagem em agricultura (ZADOKS; RABBINGE, 1985), onde um dos trabalhos mais relevantes foi o desenvolvido pelo Professor C. T. de Wit, da Universidade de Wageningen, Holanda, em 1958, intitulado "*Transpiration and crop yield*", seguido em 1968 pelo clássico trabalho "*Photosynthesis of leaf canopies*". Após tais publicações, observou-se um crescente interesse pela área de modelagem em diversos países, inclusive no Brasil.

De maneira geral, os sistemas agrícolas são complexos e possuem vários níveis organizacionais, que vão desde indivíduos compostos por uma única célula até o mais complexo sistema de produção. Uma vez que o funcionamento da agricultura está centrado

nas plantas, reações e interações com os diferentes níveis de tecidos e órgãos são combinadas para formar uma imagem deste sistema (planta), que só então é extrapolado para a produção agrícola em si. Mesmo estabelecidas essas limitações, um modelador deve ainda integrar os conhecimentos multidisciplinares (biologia, física, química, estatística e matemática) e especificar as interações de natureza distintas, como por exemplo, físicas (tempo, luz e umidade do solo), químicas (concentração de CO₂ e nutrientes) e biológicas (pragas, doenças e plantas daninhas) (STOCKLE, 1989). A complexidade destes sistemas ainda é incrementada por variações temporais e espaciais em termos de clima, características dos solos, diversidade genética e uma ampla gama de opções quanto aos possíveis manejos adotados pelos produtores.

Objetivando-se simular o crescimento e a produção de culturas, os diferentes modelos, com maior ou menor nível de empirismo em função do conhecimento sobre os fenômenos estudados, normalmente consistem no balanço do carbono - que depende da interceptação e da utilização da luz - e de um balanço hídrico - que depende da demanda atmosférica e da utilização da água pelas plantas. Estes processos fisiológicos podem ser associados à absorção dos nutrientes e às perdas causadas por pragas, doenças e plantas daninhas. A agregação destes conhecimentos por meio de equações matemáticas resulta em modelos que podem simular o crescimento e a produção das culturas (PENNING DE VRIES, 1982).

Diversos autores desenvolveram modelos que simulam o crescimento e desenvolvimento da planta, o acúmulo de matéria seca nos seus diferentes órgãos e o índice de área foliar, em função de parâmetros fenológico e climatológico (VAN KEULEN et al., 1982; VAN KEULEN; WOLF, 1986; SPITTERS et al., 1986).

Em condições favoráveis ao crescimento, os processos fisiológicos e o rendimento “potencial” das culturas são determinados, principalmente, pelas características varietais e pelos elementos do clima (temperatura, fotoperíodo e radiação solar). Esse fato torna importante a análise do crescimento e desenvolvimento da cultura em diferentes situações, pois significa que o potencial de rendimento das culturas difere entre locais e anos, e entre épocas no mesmo local (KROPFF et al., 1995; PEREIRA et al., 2002). A quantificação do potencial produtivo em diferentes áreas indica aquelas mais apropriadas para a produção de determinada cultura, além de servir, também, para estimativa da produtividade atingível, considerando eventuais quebras de rendimentos (PEDRO JÚNIOR et al., 1983; MARIN et al., 2000).

Em geral, os modelos de simulação podem ser usados para investigar uma série de assuntos relacionados à produção vegetal. Eles servem para facilitar o entendimento quanto ao desempenho da cultura dentro de seu contexto ambiental, podendo ser usados em escalas regional e global, para prever ou explorar o potencial produtivo sob certas condições (VAN ITTERSUM et al., 2003; BOUMAN et al., 1996), sendo, muitas vezes, utilizados como ferramenta de gerência e tomada decisória (MEINKE; HOCHMAN, 2000). Além disso, os modelos de simulação são utilizados para verificar teorias e testar hipóteses, melhorar o conhecimento sobre um determinado processo (MUNAKATA, 1995; BOOTE et al., 1996), além de estimular uma integração multi e interdisciplinar e descrever, de forma concisa, um grande número de observações isoladas. Por sua vez, estes modelos podem prever o desempenho do sistema, em combinações e condições não experimentadas anteriormente. De maneira geral, a aplicação destes modelos é bastante ampla, e incluem desde zoneamento agroecológico a estudos sobre o efeito das mudanças ambientais ou socioeconômicas na agricultura (BOUMAN et al., 1996).

3.3.2 Componentes do processo de modelagem

Sumariamente, modelo matemático é definido como um conjunto de relações matemáticas que descrevem as mudanças nas variáveis de estado como resultado dos diferentes processos que ocorrem nesse sistema (DE WIT, 1978; JONES et al., 1987). O sistema, por sua vez, é a coleção de componentes e suas relações que são agrupadas para estudar uma parte do mundo real. Esta seleção depende dos objetivos do estudo e é uma visão simplificada da realidade.

Entende-se como variável de estado as “quantidades” que descrevem as condições dos componentes do sistema, e que podem mudar com o tempo à medida que os componentes do sistema interagem com o meio. Se as variáveis de estado mudam no tempo, os modelos são dinâmicos. Como exemplo de variável de estado, podemos citar a quantidade total de biomassa de determinada cultura. É importante ressaltar que as variáveis de estado são, em grande parte dos modelos de simulação de crescimento e desenvolvimento de culturas, a característica de interesse do modelador (DE WIT, 1978; JONES et al., 1987).

As entradas (*Inputs*) são os fatores do meio ambiente que influenciam o desempenho do sistema, mas que não são influenciados pelo mesmo, como por exemplo, as variáveis meteorológicas. Os *Inputs* também se referem às variáveis moduladoras, que agem sobre os fluxos e variáveis de estado. Se um sistema não tem *inputs*, ele não é afetado pelo ambiente e

é denominado um sistema fechado. Os *Inputs* podem variar com o tempo. As saídas (*Outputs*) são os resultados do modelo que são de interesse do modelador.

Os parâmetros são características dos componentes do modelo que geralmente são constantes por meio do tempo simulado. A distinção entre parâmetros e *inputs* não é sempre clara. Geralmente, *inputs* são diretamente dependentes do tempo, enquanto parâmetros são constantes ou dependem do estado do sistema, mas não necessariamente do tempo. Por exemplo, os parâmetros podem definir a resposta funcional da fotossíntese à luz, a resistência do solo à densidade de fluxo de água, a resposta funcional da variação temporal do índice de área foliar e a perda de água pela planta através do processo evapotranspiratório (JONES et al., 1987).

Fluxos (ou taxas relativas), por sua vez, representam as entradas e saídas dos compartimentos das variáveis de estado. Os fluxos, que algumas vezes são os próprios processos, são sempre expressos na unidade de tempo.

As inter-relações entre os componentes e o sistema, e algumas vezes entre variáveis de estado no sistema, ocorrem como resultado de vários processos. Por exemplo, a biomassa de uma cultura (variável de estado) muda como resultado dos processos de fotossíntese e respiração.

Há muitas ferramentas disponíveis para facilitar a aplicação de modelos e simulações de sistemas contínuos. Em particular, os símbolos têm sido definidos para expressar em diagramas os componentes e os processos dos sistemas (*inputs*, *outputs*, variáveis de estado, limites do sistema e inter-relações entre eles, por exemplo). Esses procedimentos são úteis para desenvolver um modelo matemático do sistema. Além disso, tais diagramas são fundamentais para o profissional comunicar a essência do modelo com outras pessoas.

3.3.3 Análise de desempenho dos modelos

Há várias maneiras de se avaliar o desempenho de um modelo, cada qual baseada nos objetivos inicialmente propostos. Uma delas é a análise de sensibilidade, que consiste em avaliar sensibilidade do modelo à variação de valores dos parâmetros de entradas, considerando sua importância relativa para os resultados da simulação.

Outra maneira de se avaliar os modelos é definida em termos de três estágios de implementação: (i) verificação; (ii) calibração e (iii) validação.

Verificação é o processo pelo qual a lógica de programação é comparada com as intenções do modelador, ou seja, é verificado se o programa executa o que o modelador propôs.

Calibração refere-se aos ajustes (dentro de uma amplitude conhecida e baseada em literatura ou experimentos) feitos nos parâmetros do modelo para se obter uma comparação mais precisa e acurada entre os resultados simulados e os observados. O uso indiscriminado da calibração torna o modelo de difícil extrapolação e pode descaracterizar parte do seu mecanismo. Além do mais, a calibração excessiva pode ocultar falhas que poderiam refletir o mal entendimento do sistema em questão, ou a não aptidão daquele modelo às condições testadas, que podem ser diferentes daquelas de onde o mesmo foi desenvolvido.

A etapa de validação está relacionada ao estabelecimento da similaridade das respostas do modelo por meio da comparação das mesmas com um conjunto de observações independentes. Idealmente, todos os modelos mecanísticos deveriam ser validados tanto em termos da produção final, mas também em relação aos componentes internos e processos do sistema, sendo esse último aspecto de grande importância, uma vez que boas previsões podem compensar erros internos (VAN KEULEN, 1986). Porém, por questões econômicas e de tempo, visto que o grau de detalhamento e resultado de todos os processos é extremamente complexo, a verificação dessa etapa quase sempre é descartada.

Tanto na etapa de calibração quanto na validação, procedimentos qualitativos e quantitativos devem ser efetuados. O primeiro diz respeito à visualização de discrepâncias, seja nas variáveis ou nos resultados obtidos, enquanto o procedimento quantitativo geralmente refere-se às regressões lineares entre os dados simulados e os reais.

3.3.4 A modelagem na cultura de cana-de-açúcar

Segundo Scarpore et al. (2012), modelos com variados enfoques voltados à cana-de-açúcar vêm sendo publicados na literatura científica nos últimos quarenta anos, sendo que os de maior destaque no tocante ao crescimento/desenvolvimento da cultura bem como o acúmulo de matéria seca são abaixo destacados. Alguns dos principais modelos desenvolvidos no Brasil estão abaixo relacionados.

No década de 70, Ometto (1974) relacionou a estimativa da evapotranspiração potencial com o rendimento da cana-de-açúcar. Alguns anos mais tarde, Machado (1981) desenvolveu um modelo empírico para simulação do acúmulo de matéria seca a partir de informações meteorológicas. Pereira e Machado (1986) descreveram o modelo SIMCANA

(*SIMulador matemático-fisiológico do crescimento diário de uma cultura de Cana-de-açúcar*) onde os processos crescimento, fotossíntese e respiração foram integrados, sendo simulados em função das condições diárias de radiação solar global, temperatura máxima, mínima e umidade relativa do ar.

Na década de 90, Villa Nova e Barbieri (1991) adaptaram para a cana-de-açúcar o modelo matemático-fisiológico proposto por de Wit (1965). Esse modelo relaciona a produtividade mensal de biomassa com alguns elementos meteorológicos (temperaturas extremas do ar, fotoperíodo e insolação), aliados ao *deficit* hídrico ao longo do ciclo. Araújo (1993) utilizou essas modificações para estimar a produtividade potencial da cana-de-açúcar, com a finalidade de elaborar o zoneamento da produtividade potencial da cultura no Estado do Rio de Janeiro, tendo verificado que os valores estimados pelo modelo foram bem próximos aos valores de produtividade de cana irrigada. Barbieri (1993) desenvolveu um modelo matemático-fisiológico de estimação de produtividade potencial da cana-de-açúcar que descreve o desempenho fisiológico da planta em resposta às condições ambientais, simulando o acúmulo potencial de matéria seca durante o ciclo. Rojas (1998) empregou o modelo de Jensen (1968) para estimar os efeitos da deficiência hídrica na produtividade cana-de-açúcar no município de Araras, SP. Este autor fez uma adaptação considerando que o valor do coeficiente de sensibilidade à deficiência hídrica na última fase de desenvolvimento da cultura tem pouca influência no resultado final. Desse modo, a produtividade real da cana-de-açúcar (colmo e açúcar) pode ser estimada com 4 a 6 meses de antecedência.

Na década seguinte, Teramoto (2003) avaliou o modelo matemático para estimativa de produtividade relativa de cana-de-açúcar baseado em parâmetros do solo e o modelo da FAO (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*) para estimativa do potencial produtivo da cana-de-açúcar mês a mês durante um ano. A metodologia usada no modelo da FAO emprega adaptações propostas por Barbieri e Tuon (1992). Suguitani (2006) usou o modelo explanatório MOSICAS (MARTINÉ, 2003) desenvolvido pelo CIRAD (*Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement*) para simulação de crescimento de quatro variedades em condições edafoclimáticas do Estado de São Paulo, apresentando resultados importantes, com valores simulados para massa seca da parte aérea e índice de área foliar similares aos observados em campo.

Scarpate (2011) adequou o modelo agrohidrológico SWAP/WOFOST (VAN DAM et al., 2008) para a simulação de crescimento da massa seca da parte aérea da cana-de-açúcar com dados experimentais conduzidos na região canavieira paulista. Esse

modelo foi aplicado às condições edafoclimáticas da região centro-sul brasileira apresentando bons resultados para a previsão da massa fresca de colmos industrializáveis em um leque de 25 variedades cultivadas.

Quanto aos modelos de simulação de crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar propostos por grandes centros de pesquisa do exterior, destacam-se alguns, a saber: CANEGRO, CANESIM, APSIM - Sugarcane e QCANE.

O modelo CANEGRO (*sugarCANE GROWth model*) foi desenvolvido pela Associação Sul Africana do Açúcar (INMAN-BAMBER, 1995) e incluído no DSSAT (*Decision Support System for Agrotechnology Transfer*) - uma plataforma computacional de modelos. Este modelo simula o crescimento da cana-de-açúcar usando informações dos elementos meteorológicos (radiação solar, precipitação pluvial e temperatura do ar) e do balanço hídrico (capacidade de campo, ponto de murcha permanente e profundidade do perfil do solo), sendo o impacto do estresse hídrico simulado pelo ajuste dos diferentes processos da planta como a absorção de água, assimilação de CO₂ e crescimento estrutural, de acordo com as aproximações propostas por Singels e Bezuidenhout (2002). Nassif (2010) menciona que estudos estão sendo conduzidos na África do Sul para modelar os mecanismos de acumulação de sacarose pois, algumas tentativas foram realizadas, sem sucesso, em função do pouco conhecimento sobre os mecanismos relacionados à partição dos fotoassimilados na cana-de-açúcar e ao acúmulo de sacarose nos colmos.

O modelo CANESIM também desenvolvido na África do Sul, evoluiu de um modelo proposto para o controle de irrigação da cana-de-açúcar, o IRRICANE (SINGELS et al., 1998), com a inclusão de rotinas para simular a produtividade e também de um modelo para simular a área foliar da cultura. Apesar de ter disso desenvolvido com os mesmos conceitos básicos do CANEGRO, este modelo é mais simples e requer menos parâmetros de entrada.

Na Austrália, Bull e Tovey (1974) iniciaram estudo com modelos para a cana-de-açúcar gerando posteriormente o APSIM-Sugarcane (*Agricultural Production Systems sIMulator*). Descrito por Keating et al. (1999), esse modelo opera em escala diária e relaciona o crescimento da cultura em função da radiação interceptada, a qual produz fotoassimilados que são particionados entre os diversos órgãos da planta. O processo fisiológico representado nesse modelo é governado pela radiação, temperatura do ar, suprimento de água e nitrogênio (N). Este modelo simula o crescimento, o uso de água, acúmulo de N, teor de açúcar e matéria

seca e fresca de colmos para o ciclo da cana-planta e socas. Sua validação foi realizada em amplo conjunto de dados espalhados em diversas regiões produtoras ao redor do mundo.

Outro modelo australiano, o QCANE (LIU; BULL, 2001) foi desenvolvido para simular o crescimento e o acúmulo de açúcar nos colmos. Seu dinamismo baseia-se nos processos de desenvolvimento, incluindo o desenvolvimento do dossel, a fotossíntese, a respiração e a partição de carboidratos em órgãos vegetais para o crescimento. A respiração é ditada pelo desenvolvimento fenológico e ambientes em mudança. O balanço hídrico e o módulo de nitrogênio são adaptados a partir do CERES - Maize (JONES; KINIRY, 1986).

3.3.5 Simulação estocástica pelo método de Monte Carlo

Os modelos de simulação probabilísticos tiveram sua origem no método de Monte Carlo e têm como foco simulações de fenômenos aleatórios, introduzindo a análise de riscos, incorporando as variáveis ambientais e, conseqüentemente, os elementos de incerteza inerentes (NASCIMENTO; ZUCCHI, 1997). Portanto, o método de Monte Carlo trata-se de um processo computacional que utiliza números aleatórios para produzir resultados. Assim, em vez de ter entradas fixas, distribuições de probabilidade são atribuídas a algumas ou todas as entradas. Isto gerará uma distribuição de probabilidade para a saída, após a simulação ser executada.

Para executar a simulação pelo método de Monte Carlo existem algumas fases básicas que devem ser seguidas: (i) definição das variáveis envolvidas com base em dados passados ou em estimativas subjetivas dos administradores; (ii) identificação das distribuições de probabilidades das variáveis aleatórias relevantes para o estudo; (iii) construção das distribuições de probabilidades acumuladas para cada uma das variáveis definidas; (iv) definição dos intervalos dos números aleatórios para cada variável (limite inferior e superior); e (v) geração dos números aleatórios e simulação dos experimentos (LUSTOSA et al., 2004).

Ressalta-se que as populações analisadas devem ter certos parâmetros, como média e desvio padrão, e podem apresentar várias “formas” como normal, exponencial e uniforme. As amostras obtidas devem ser aleatórias o que, computacionalmente são facilmente obtidas utilizando um gerador de números aleatórios. Os números gerados são pseudoaleatórios, mas, geralmente, são suficientes para obter aproximações razoáveis de números aleatórios e podem ser utilizados para obter amostras aleatórias de alguma população de interesse.

3.3.6 Caracterização dos elementos do clima

Entende-se por variáveis aleatórias contínuas aquelas em que os possíveis valores das variáveis ocorrem aleatoriamente e pertencem a um intervalo dos números reais, portanto, onde se enquadram as variáveis climáticas. Ao contrário das variáveis aleatórias discretas, as contínuas possuem um número infinito de ocorrências e, por isso, a função densidade de probabilidade não trabalha com valores pontuais e sim com intervalos infinitesimais, sendo que as probabilidades são calculadas por meio de integrais (DANTAS, 2008).

O uso de funções densidade de probabilidade está diretamente ligado à natureza dos dados a que elas se relacionam. Algumas possuem boa capacidade de estimação para pequeno número de dados, outras requerem grande série de observações. Devido ao número de parâmetros de sua equação, algumas podem assumir diferentes formas, enquadrando-se em um número maior de situações. Desde que respeitado o aspecto da representatividade dos dados, as estimações dos seus parâmetros, para uma determinada região, podem ser estabelecidas como de uso geral, sem prejuízo da precisão na estimação da probabilidade (CATALUNHA et al., 2002).

O ajuste de modelos probabilísticos aos dados diários de atributos do clima fornece um resumo sucinto desses dados, além de representar uma técnica eficiente para a análise dessas informações. A forma com que a distribuição de frequências é apresentada pode ser aproximada por meio da utilização de equações de densidade de probabilidade com alguns parâmetros extraídos da amostra em questão. A utilização ou não de uma distribuição reside na capacidade da mesma em estimar os dados observados, com base em seus parâmetros, e esta capacidade é medida por meio de testes de aderência.

Muitas são as distribuições de probabilidades conhecidas para ajuste de variáveis aleatórias contínuas, dentre as quais se destacam as distribuições: Uniforme; Normal; Log-normal; Exponencial; Gama e Weibull (MAGALHÃES; LIMA, 2010).

Este estudo abordou as distribuições normal (bivariada), gama e Weibull, tendo em vista ser a primeira a distribuição de probabilidade contínua mais importante sob a ótica do conhecimento agrônomo, considerando a quantidade de fenômenos que podem ser estudados por seu intermédio e serem as distribuições gama e Weibull extremamente versáteis, função da flexibilidade para assumir diferentes formas e simetrias, condição oportuna para o propósito da simulação dos elementos do clima.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Obtenção das séries históricas dos dados meteorológicos

As informações diárias referentes aos dados meteorológicos em Piracicaba foram obtidos no Departamento de Engenharia de Biosistemas da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ), da Universidade de São Paulo (USP). A Estação Meteorológica Convencional de Piracicaba está localizada nas seguintes coordenadas: latitude: 22°42’30"S; longitude de 47°38’30"W e altitude: 546 metros.

Segundo a classificação climática de Köppen, o clima da região é do tipo *Cwa*, caracterizado por um total de chuvas no mês mais seco (agosto) de 28,4 mm e do mês mais chuvoso (janeiro) de 229,7 mm, sendo a precipitação total anual de 1328 mm. A temperatura média do mês mais quente é de 25°C, e a do mês mais frio de 17°C, sendo a temperatura média anual de 21,6°C (CEPAGRI, 2012). Segundo Villa Nova (2003), a radiação solar global média anual é de 435 cal cm⁻² d⁻¹.

As observações utilizadas neste estudo se referem às temperaturas mínima, máxima e média diárias, em graus Celsius (°C), a radiação solar global diária, em cal cm⁻² d⁻¹ e a precipitação, em mm. As séries históricas de temperatura e precipitação abrangem o período de 1º de janeiro de 1917 a 31 de dezembro de 2011, num total de 94 anos; já a série histórica de radiação solar global diária compreende o período de 1º de janeiro de 1981 a 31 de dezembro de 2011, totalizando 31 anos. Para os testes de aderência foram utilizadas as séries em toda sua extensão; já as simulações foram baseadas nos últimos 31 anos, em função da correlação existente entre radiação solar global e temperatura média do ar. É importante ressaltar que a OMM (1975), com base em princípios estatísticos de tendência de valor médio, indica que o clima de uma dada região deve ser caracterizado com base no período mínimo de 30 anos consecutivos.

4.2 Teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov

Muitos são os possíveis métodos para ajustar uma distribuição de probabilidade a um conjunto de dados, para um valor particular de significância (α), verificando se a hipótese da distribuição do modelo teórico qualquer pode representar adequadamente um conjunto de informações, ou seja, se os valores amostrais podem ser razoavelmente considerados como

provenientes de uma população com a distribuição teórica. *Softwares* como o R possuem a facilidade de, simultaneamente, testar o ajuste do modelo teórico por meio de diferentes métodos, dentre os quais se destacam o teste de aderência, ou bondade do ajuste, de *Kolmogorov-Smirnov*.

Desenvolvido pelos matemáticos russos *Andrei Nikolaevich Kolmogorov* e *Vladimir Ivanovich Smirnov*, este teste observa a máxima diferença absoluta (D) entre a função de distribuição acumulada assumida para os dados $F(X)$ e a função de distribuição empírica dos dados $S(X)$. Logo:

$$D = |F(X) - S(X)| \quad (1)$$

Como critério, compara-se D com d (valor crítico ou desvio máximo tabelado para dado nível de significância) apresentados em Campos (1983), ou calculado para um número de amostras superior a 50, conforme segue:

$$d = \frac{1,36}{\sqrt{n}} \quad (2)$$

em que n é o número de anos da série histórica (amostra).

Se D for menor que d , existe concordância entre as frequências observadas e esperadas, portanto, a amostra provém de uma população que segue a distribuição de probabilidade sob teste. Ou seja, para verificar o ajuste da distribuição aos dados, a um nível de significância (α) de 5%, a hipótese a ser testada é que $H_0: F \equiv F_0$ (os dados seguem uma dada distribuição) *versus* $H_a: F \neq F_0$, (os dados não seguem a distribuição em questão) para pelo menos um valor da variável aleatória X , rejeitando H_0 se $D \geq d$.

A verificação do ajuste das distribuições de probabilidade (normal, gama e Weibull) foi realizada para todos os dias do ano para a temperatura média do ar e radiação solar global, em Piracicaba, por meio do *software* R, pacote *MASS*.

4.3 Distribuições de probabilidade avaliadas para os elementos do clima

A **distribuição normal** é uma distribuição de dois parâmetros, μ (média) e σ^2 (variância), ou seja, $X \sim N(\mu, \sigma^2)$, sua densidade de probabilidade e função cumulativa de distribuição são apresentadas, respectivamente, nas equações 3 e 4:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2} \right) \quad (-\infty < x < +\infty) \quad (3)$$

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp \left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2} \right) dx \quad (4)$$

sendo $-\infty < \mu < +\infty$ e $\sigma^2 > 0$ obtidos por máxima verossimilhança (FISHER, 1941).

Segundo Meyer (1974), no cálculo de probabilidades para variáveis contínuas, deve-se resolver a integral $F(x)$, isto é, $P(a \leq X \leq b)$. Contudo, essa equação não pode ser resolvida analiticamente sem o uso de métodos de integração complexos e, por essa razão, as probabilidades para o modelo normal são calculadas com o auxílio de Tabelas. Para se evitar a multiplicação desnecessária de Tabelas para cada par de valores (μ, σ^2) , utiliza-se uma transformação (padronização de dados), que conduz sempre ao cálculo de probabilidades com uma variável de parâmetros (0,1), isto é, média 0 e variância 1.

Por essa razão usa-se a transformação $z = \frac{(x-\mu)}{\sigma}$, sendo que a variável z é chamada variável reduzida e possui distribuição normal com média zero e variância um, portanto, não afeta a normalidade. Logo, a função densidade de probabilidade da distribuição normal reduzida $f(z)$ é dada por:

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{z^2}{2} \right] \quad (-\infty < z < +\infty) \quad (5)$$

Figura 4 – Função densidade estimada ($f(x)$) (A) e função cumulativa estimada ($F(x)$ - probabilidade acumulada) (B) da distribuição normal, para $N(23,6; 2,5)$ (Temperatura média do ar)

Quanto à **distribuição normal bivariada**, trata-se de uma distribuição normal a duas dimensões das variáveis contínuas X_1 (no caso, a radiação solar global) e X_2 (temperatura média do ar). Portanto, é uma generalização da distribuição normal para uma variável X com função densidade de probabilidade denotada por:

$$f(x_1, x_2) = \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2\sqrt{1-\rho^2}} \exp\left(\frac{-t}{2}\right) \quad (6)$$

$$t = \left\{ \frac{1}{(1-\rho^2)} \left[\left(\frac{x_1 - \mu_1}{\sigma_1} \right)^2 - 2\rho \left(\frac{x_1 - \mu_1}{\sigma_1} \right) \left(\frac{x_2 - \mu_2}{\sigma_2} \right) + \left(\frac{x_2 - \mu_2}{\sigma_2} \right)^2 \right] \right\}, \quad (-\infty < x_1, x_2 < \infty) \quad (7)$$

Com parâmetros média μ , variância σ^2 e a correlação ρ entre as variáveis:

$$\mu = \begin{bmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

em que μ é o vetor de médias, sendo μ_1 a média da radiação solar global e μ_2 é a média da temperatura média do ar.

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & COV(\sigma_1\sigma_2) \\ COV(\sigma_1\sigma_2) & \sigma_2^2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

em que Σ é a matriz de covariância; σ_1^2 é a variância da radiação solar global; σ_2^2 é a variância da temperatura e $COV(\sigma_1\sigma_2)$ é a covariância entre as duas variáveis (MORRISON, 1990).

As propriedades da função distribuição de probabilidade normal bivariada são as seguintes: (i) $f(x_1, x_2)$ é a função densidade de probabilidade; (ii) a variável x_1 possui distribuição normal (μ_1, σ_1^2) e x_2 possui distribuição normal (μ_2, σ_2^2) ; e (iii) ρ é o coeficiente de correlação entre x_1 e x_2 . Portanto, as variáveis reduzidas z_1 e z_2 bem como a função densidade de probabilidade da distribuição normal bivariada $f(z_1, z_2)$ são assim representadas:

$$z_1 = \left(\frac{x_1 - \mu_1}{\sigma_1} \right) \quad (10) \quad z_2 = \left(\frac{x_2 - \mu_2}{\sigma_2} \right) \quad (11)$$

$$f(z_1, z_2) = \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho^2}} \exp\left[-\frac{1}{2(1-\rho^2)} (z_1^2 - 2\rho z_1 z_2 + z_2^2) \right] \quad (12)$$

Figura 5 – Representação da distribuição normal bivariada para $N(\mu, \Sigma)$

Muitas variáveis aleatórias contínuas possuem assimetria positiva, ou seja, são distorcidas à direita, como o caso da **distribuição gama**. Frequentemente a distorção ocorre quando há um limite físico à esquerda que é relativamente próximo a variação dos dados. Exemplos comuns desta situação são as quantias de precipitação, velocidade do vento e radiação solar, que são fisicamente “não” negativas.

A função densidade de probabilidade da distribuição gama pode ser dada por:

$$f(x) = \frac{x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \quad \text{para } x \geq 0 \quad (13)$$

$\Gamma(\alpha)$ é a função Gama incompleta definida por Abramowitz e Stegun (1972) como:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty x^{\alpha-1} e^{-x} dx \quad (14)$$

com $\mu = \alpha \beta$ e $\sigma^2 = \alpha \beta^2$. Os parâmetros α ($\alpha > 0$) e $1/\beta$ ($\beta > 0$) são, respectivamente, parâmetros de forma e escala da distribuição, que podem ser estimados pelo método da máxima verossimilhança.

Conforme descrito em trabalhos como os de Blain et al. (2007) e Blain (2009), a função densidade $f(x)$ assume diversas formas, de acordo com a variação de α : valores desse parâmetro inferiores a 1 resultam em uma distribuição fortemente assimétrica com $F(x)$ tendendo ao infinito para x tendendo a 0. Em $\alpha=1$ a função intercepta o eixo vertical em $\lambda=1/\beta$, para $x=0$; neste caso, a distribuição gama retorna a **distribuição exponencial**, cuja densidade é dada por:

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x} \quad \text{para } x \geq 0 \quad (15)$$

em que $\lambda > 0$, $\mu = 1/\lambda$ e $\sigma^2 = 1/\lambda^2$.

Portanto, se x possui distribuição gama com parâmetros λ (também chamado de parâmetro de taxa) e α , isto é, $X \sim G(\alpha, \lambda)$, então a função gama também pode ser descrita da seguinte maneira:

$$f(x) = \frac{\lambda^\alpha x^{\alpha-1} e^{-\lambda x}}{\Gamma(\alpha)} \quad \text{para } x \geq 0 \quad (16)$$

Figura 6 – Efeito da variação dos parâmetros β (escala) (A) e α (forma) (B) na função de distribuição gama

Figura 7 – Função densidade estimada ($f(x)$) (A) e função cumulativa estimada ($F(x)$ - probabilidade acumulada) (B) da distribuição gama, para $G(27,5; 1,6)$ (Temperatura média do ar)

A **distribuição Weibull** foi proposta originalmente por Ernest Hjalmar Wallodi Weibull, físico sueco que, em 1939, apresentou o modelo de planejamento estatístico sobre fadiga de material. Posteriormente, foi publicado o estudo denominado de “A Statistical

Distribution of Wide Applicability”, onde o modelo foi aplicado para tipos distintos de amostras (WEIBULL, 1951).

Assim como a distribuição anterior, esta distribuição tem como grande vantagem o fato de poder se aproximar de outras distribuições - como a distribuição exponencial e a distribuição normal - dependendo do valor de seus parâmetros. Portanto, a sua popularidade em aplicações práticas deve-se ao fato de ela apresentar uma grande variedade de formas, todas com uma propriedade básica: a sua função de taxa de falha é monótona; isto é, ou ela é crescente ou é decrescente ou é constante.

A função densidade de probabilidade Weibull é apresentada de diversas formas, podendo ser apresentada como:

$$f(x) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{x - x_0}{\beta} \right)^{\alpha-1} \exp \left(- \left(\frac{x - x_0}{\beta} \right)^{\alpha} \right) \quad \text{para } x > 0 \quad (17)$$

em que X é a variável aleatória $x_0 \geq 0$; $\beta > 0$ e $\alpha > 0$ são os parâmetros da distribuição, respectivamente, posição, escala e forma.

O parâmetro x_0 controla a posição da curva sobre o eixo das abscissas. Quando x_0 é igual à zero (menor valor da amostra), a distribuição inicia-se neste valor, surgindo um caso especial, que é a distribuição Weibull com dois parâmetros, representada por:

$$F(x) = \int_0^x f(x) dx = 1 - \exp \left(- \left(\frac{x}{\beta} \right)^{\alpha} \right) \quad \text{para } x > 0 \quad (18)$$

Os parâmetros α e β - $X \sim W(\alpha, \beta)$ - foram estimados pelo método de máxima verossimilhança.

Figura 8 – Função densidade estimada ($f(x)$) (A) e função cumulativa estimada ($F(x)$ - probabilidade acumulada) (B) da distribuição Weibull, para $W(11,2; 24,2)$ (Temperatura média do ar)

Segundo Botelho e Moraes (1999), diferentes métodos podem ser utilizados para a estimação dos parâmetros (μ , σ^2 , α e β) devido à complexidade dos cálculos envolvidos; porém, todos possuem limitações, sendo o **método da máxima verossimilhança** um dos mais utilizados, o que corrobora a orientação de Thom (1966) que diz preferir tal método devido as suas melhores propriedades assintóticas (normalidade).

As estimações dos parâmetros das distribuições normal, gama e Weibull foram obtidas por intermédio da função *fitdistr*, do pacote *MASS*, *software* R 2.15.0. Esta função necessita de argumentos como um vetor de dados, no caso, os valores de temperatura média do ar e radiação solar em cada um dos 365 dias do ano, e um comando indicativo da distribuição que será utilizada. Esta função retorna as estimativas dos parâmetros e seus respectivos erros-padrão.

4.4 Processo de simulação - geração de números aleatórios e de variáveis aleatórias

No método de Monte Carlo, a rotina de geração de números aleatórios para simulação envolve duas etapas. Primeiro, é obtida uma sequência de números aleatórios distribuída uniformemente entre zero e um (ou seja, a probabilidade de se obter cada número na sequência é exatamente igual para todos os números na sequência). Então, esta sequência é transformada de modo a produzir números aleatórios que satisfaçam a distribuição desejada. O primeiro processo é chamado geração aleatória de números, e o segundo, geração aleatória de variáveis aleatórias.

A maioria das linguagens de programação (Pascal, Java, Basic, C++, SAS, R e FORTRAN), pacotes estatísticos ou planilhas de cálculo possuem um gerador de números aleatórios que fazem as execuções a partir de uma distribuição uniforme. Contudo, na maioria dos problemas do mundo real, as variáveis aleatórias seguem distribuições diferentes da uniforme, tal como a normal.

Há muitas maneiras para executar a “transformação” acima citada, dentre as quais se destaca a **transformação inversa**. Este método está baseado no fato de que a distribuição acumulada $F(X)$ tem valor entre 0 e 1, ou seja, no mesmo intervalo de um número qualquer U gerado aleatoriamente. Assim sendo, tendo U e considerando este valor como sendo um valor de $F(X)$, encontra-se o valor de X resolvendo a equação inversa de $F(X)$. Segundo Naylor (1971), para gerar valores aleatórios x_i de alguma população estatística particular, cuja função de densidade é dada por $f(x)$, deve-se primeiro obter a função de distribuição cumulativa $F(X)$. Deste modo temos:

$$F(X) = \int_{-\infty}^x f(t)dt = U \quad (19)$$

Logo,

$$P[U \leq F(x)] = P[F^{-1}(U) \leq x] \quad (20)$$

Consequentemente, $F^{-1}(U)$ é uma variável que tem como sua função densidade de probabilidade $f(x)$.

Apesar de bastante versátil, o método da transformação inversa só pode ser usado se uma expressão analítica puder ser obtida para a função de distribuição acumulada $F(x)$, e ela possa ser resolvida explicitamente para X , como no caso da distribuição Weibull.

Ressalta-se que, no caso da simulação da magnitude da radiação solar global por intermédio da distribuição Weibull, por uma questão de “não” convergência de dados em determinados dias calculados pelo *software* R, utilizou-se o *software* SAS para a simulação. Para tanto, inicialmente fez-se o uso da distribuição exponencial para estimação de um “valor inicial” de alfa. Com o valor estimado de alfa, mantendo $\beta=1$, obtiveram-se os parâmetros α e β usados na simulação Weibull.

Contudo, há situações em que a utilização da transformação inversa não é possível, como para a distribuição normal e a gama. Nestes casos, aplica-se a **simulação direta**. Portanto, para a simulação normal bivariada, o *software* R baseia-se na metodologia proposta por Genz (1992). A simulação gama utiliza a metodologia proposta por Ahrens e Dieter (1974) para $0 < \alpha < 1$ e Ahrens e Dieter (1982) para $\alpha \geq 1$.

Para a simulação utilizando a distribuição normal bivariada, tem-se que a radiação solar global (Q_g), por governar praticamente todos os processos na Terra, deve ser gerada primeiramente, segundo Hogg e Craig (1978) da seguinte maneira:

$$Q_g = \mu_{Q_g} + \sigma_{Q_g} \cdot Z_1 \quad (21)$$

Os valores simulados de temperatura (T) são obtidos da seguinte equação:

$$T = \left(\mu_T + \left(\rho \frac{\sigma_T}{\sigma_{Q_g}} \right) (Q_{g_i} - \mu_{Q_g}) \right) + \sqrt{(1 - \rho^2)} \cdot \sigma_T \cdot Z_2 \quad (22)$$

Neste contexto, a ordem de magnitude da Q_g e da T foram obtidas por intermédio dos três tipos de distribuição, sendo que na Weibull e na gama, os eventos ocorreram independentemente, e na distribuição normal bivariada, Q_g e T foram obtidas conjuntamente, considerando a relação de dependência entre as variáveis (acima mencionado).

Para cada dia do ano foram estimados 1000 valores de Qg e T que, posteriormente, foram utilizados no modelo de crescimento e desenvolvimento de cana-de-açúcar.

A simulação da precipitação diária (P) foi realizada por intermédio da distribuição gama. Esta função tem sido a mais comum e eficiente no estudo da distribuição dos valores “diferentes de zero” de precipitação pluvial, conforme relatam inúmeros autores como (ASSIS, 1991; WILKS, 1999; CASTELLVÍ et al., 2004; DOURADO NETO et al., 2005b; MURTA et al., 2005; da SILVA et al., 2007).

4.5 Avaliação do processo de simulação

Para a avaliação do desempenho do processo de simulação da magnitude da radiação solar global e temperatura média diária, realizou-se a comparação dos parâmetros dos dados originais observados com os valores dos parâmetros das simulações realizadas.

Para tanto, utilizou-se a técnica de análise de Regressão linear simples que constitui uma tentativa de estabelecer uma equação matemática linear que descreva o relacionamento entre duas variáveis (MORETTIN; BUSSAB, 2003), e, complementarmente, utilizaram-se indicadores estatísticos como: (i) coeficientes de correlação de Pearson, que mede o grau de correlação linear entre duas variáveis; (r) (MORETTIN; BUSSAB, 2003); (ii) o índice de concordância de Willmott, relacionado ao afastamento dos valores simulados em relação aos observados (d) (WILLMOTT, 1981), apresentado na equação 28 e (iii) o índice de desempenho de Camargo (c) (CAMARGO; SENTELHAS, 1997), conforme descrito na equação 29.

$$a = \bar{S} - b\bar{O} \quad (23)$$

em que,

$$b = \frac{n \sum_{i=1}^n O_i S_i - \sum_{i=1}^n O_i \sum_{i=1}^n S_i}{n \sum_{i=1}^n O_i^2 - (\sum_{i=1}^n O_i)^2} \quad (24)$$

$$\bar{S} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{n} \quad (25)$$

$$\bar{O} = \frac{\sum_{i=1}^n O_i}{n} \quad (26)$$

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n O_i S_i - \sum_{i=1}^n O_i \sum_{i=1}^n S_i}{\sqrt{\left[\left(n \sum_{i=1}^n O_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^n O_i \right)^2 \right] \left[\left(n \sum_{i=1}^n S_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^n S_i \right)^2 \right]}} \quad (27)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|S_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (28) \quad c = r.d \quad (29)$$

em que S_i refere-se ao parâmetro simulado no i -ésimo período; O_i ao parâmetro observado no i -ésimo período; $\bar{S}$ refere-se à média do parâmetro simulado; $\bar{O}$ à média do parâmetro observado e n ao número de períodos avaliados.

Para a comparação dos parâmetros da média observada e média simulada, realizou-se o teste t para a hipótese de igualdade entre as duas médias, com variâncias estimadas, onde a hipótese nula ($H_0: \mu_1 = \mu_2$) e a hipótese alternativa ($H_1: \mu_1 \neq \mu_2$) (teste bilateral) foram testadas para cada um dos 365 dias do ano, por intermédio das equações que seguem:

$$t_{cal} = \frac{(\bar{X}_{ob} - \bar{X}_{sim})}{\sqrt{S_m^2}} \quad (30)$$

em que t_{cal} é o valor calculado de t dado por $\bar{X}_{ob}$, que é a média observada da variável; $\bar{X}_{sim}$ é a média das 1000 simulações e S_m^2 é a estimativa da variância da diferença entre as estimativas de duas médias, calculada da seguinte forma:

$$S_m^2 = \frac{(n_{ob} - 1)S_{ob}^2 + (n_{sim} - 1)S_{sim}^2}{n_{ob} + n_{sim} - 2} \quad (31)$$

em que n_{ob} é o número de observações da variável observada; n_{sim} é o número de observações da variável simulada (1000), e s_{ob}^2 e s_{sim}^2 são as variâncias das variáveis observadas e simuladas, respectivamente. Nesse caso, se $t_{cal} > t_{tab}$ ou $t_{cal} < -t_{tab}$ ($\alpha/2$, $n_{ob} + n_{sim} - 2$), rejeita-se a hipótese nula em favor da hipótese alternativa, ou seja, as médias obtidas e simuladas no dia em questão diferem ao nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste t .

4.6 Descrição do modelo

O modelo proposto tem como base os processos determinantes que mais afetam o crescimento e desenvolvimento das culturas, abordagem inicialmente reportada por Spitters e Schapendonk (1990).

Dessa maneira, a produtividade potencial (*PP*) (item 4.6.1) foi obtida como o produto da relação linear entre a produção de biomassa e a quantidade de radiação interceptada pela cultura (MONTEITH, 1994), crescida sob adequadas condições de disponibilidade de água e nutrientes, na ausência de pragas, doenças e plantas daninhas. O total de biomassa formado foi dividido entre os diferentes órgãos da planta por meio de coeficientes de partição, em função do estágio de desenvolvimento fenológico da cultura.

A *PP* foi, então, deplecionada (*PD*) em função da disponibilidade hídrica (item 4.6.2) e teve como base o balanço proposto por Charles Warren Thornthwaite (1948) e posteriormente modificado por John Russ Mather (1955). Essa proposta consiste em relacionar a precipitação pluvial e a evapotranspiração, considerando-se uma determinada capacidade de armazenamento de água no solo. Esse método inclui estimativas da evapotranspiração real, *deficit* hídrico e excedente hídrico e considera que a taxa de retirada de água no solo varia exponencialmente enquanto que a reposição é direta, somando-se ao armazenamento de água do solo o saldo positivo do balanço entre precipitação e evapotranspiração.

Quanto à estimação de parâmetros visando o auxílio ao planejamento do plantio e da colheita (item 4.6.3), incorporou-se ao modelo a curva de maturação (variação temporal da Pol% cana - *p*, %) para a variedade de interesse e em dois ambientes de produção (AP), objetivando determinar a ordem de grandeza, em termos de *p*, e o período de ocorrência da produção de açúcar (variação temporal).

Para a calibração do modelo foram utilizadas informações provenientes de Literatura específica e dados de experimentos de campo conduzidos em Piracicaba, São Paulo, com latitudes entre 22° 30' e 22° 50' sul e longitudes entre 47° 40' e 47° 50' oeste, nas safras 2005/2006 e 2010/2011, respectivamente em dois AP(s) - cenários A e B.

Cenário A: Associação de Argissolos Vermelho-Amarelos distróficos (*PVAd*) de textura média, com Cambissolos distróficos (*CXd*) (EMBRAPA, 1999), de textura média - ambiente de produção D. O plantio ocorreu em 29/4/2005 e a colheita em 17/8/2006, com produtividade média de 137,3 t ha⁻¹.

Cenário B: Associação de Cambissolos distróficos (*CXd*) de textura média com de Argissolos Vermelho-Amarelos distróficos (*PVAd*) (EMBRAPA, 1999), de textura média - ambiente de produção E. O plantio ocorreu em 3/5/2010 e a colheita em 30/7/2011, com produtividade média de 137,1 t ha⁻¹ (cenário base para a calibração).

Não houve registro de doenças de solo nos ambientes em questão. O espaçamento utilizado foi de 1,40 m e a colheita mecanizada, tendo sido utilizada em todos os AP(s) a mesma variedade cultivada (RB867515), desenvolvida pela Universidade Federal de Viçosa (UFV), Minas Gerais, e que corresponde a, aproximadamente, 32% da área plantada deste grupo (base plantio 2011/2012).

Como principais aspectos gerais desta variedade cultivada, destacam-se: alta velocidade de crescimento (sobretudo no período inicial), porte alto, hábito de crescimento ereto, alta densidade de colmo, fácil despalha, alta produtividade, colheita de julho até outubro, baixo perfilhamento da cana planta e médio em cana soca, bom fechamento, tolerante à seca, florescimento e tombamento eventuais, exigências em AP baixa, PUI longo, alto teor de sacarose e baixo teor de fibra.

Figura 9 – Variedade cultivada RB867515

4.6.1 Estimação da produtividade potencial

A influência da temperatura na ordem de magnitude do tempo em que a cultura permaneceu à campo, bem como no momento indicativo de mudança nos estádios fenológicos, pode ser representada utilizando-se o conceito da soma térmica.

A maneira mais simples de cálculo da soma térmica é a que acumula os graus-dia acima de um valor crítico inferior (temperatura basal). Geralmente, existe um máximo na curva de resposta acima do qual a taxa de desenvolvimento diminuirá e há também um limiar mínimo, abaixo da qual não ocorre desenvolvimento. No meio destas temperaturas a taxa de desenvolvimento é praticamente proporcional à temperatura efetiva, que corresponde à temperatura média descontada a temperatura basal.

O modelo proposto calcula a soma térmica (ST , °C d), por meio do acúmulo dos valores diários da temperatura efetiva, e tem-se para seu cálculo que:

$$TEF_x = T_x - T_{bi} \quad se \quad T_{bi} \leq T_x \leq T_{bs} \quad (32)$$

$$TEF_x = 0 \quad se \quad T_x < T_{bi} \text{ ou } T_x > T_{bs} \quad (33)$$

$$ST_j = \Delta t \sum_{x=1}^j TEF_x \quad (34)$$

em que T_x é a temperatura média do x -ésimo dia (°C); T_{bi} é a temperatura basal inferior (°C); T_{bs} a temperatura basal superior (°C); TEF_x é a temperatura efetiva do x -ésimo dia (°C); e Δt é o intervalo de tempo (1 dia).

Do plantio até a emergência, calcula-se a soma térmica de maneira análoga, até esta somatória atingir um valor pré-estabelecido (ST_{em} , °C d), quando então esta deixa de existir e o modelo passa a calcular somente a soma térmica ST_x .

O desenvolvimento relativo no x -ésimo dia após a emergência, na fase vegetativa até início da maturação ($DVRa_x$, d⁻¹) e durante a maturação ($DVRb_x$, d⁻¹) são calculados, respectivamente, das seguintes maneiras:

$$DVRa_x = \frac{1}{ST1} TEF_x \quad (35)$$

$$DVRb_x = \frac{1}{ST2} TEF_x \quad (36)$$

em que $ST1$ e $ST2$ (°Cd) são parâmetros fixos do modelo e representam, respectivamente, a soma térmica durante a fase da emergência até início da maturação (crescimento vegetativo) e do início desta até o momento da colheita. Em relação à fase de maturação, o modelo calcula, também, o momento “ideal” de colheita com base na curva de maturação (maximização de colmos e de açúcar) da variedade cultivada em questão.

Portanto, para cálculo do desenvolvimento fenológico no x -ésimo dia do ciclo da cultura (DVF_x), respectivamente para a fases acima mencionadas, tem-se que:

$$\text{Se } DVF_{x-1} < 1, \quad DVF_x = DVF_{x-1} + DVRa_x \quad (37)$$

$$\text{Se } DVF_{x-1} \geq 1, \quad DVF_x = DVF_{x-1} + DVRb_x \quad (38)$$

O índice de área foliar (IAF_x) é obtido integrando o resultado entre taxa de crescimento foliar e a taxa de senescência foliar ao longo do tempo ($rIAF$). Para tanto, tem-se que:

$$rIAF_x = cIAF_x - sIAF_x \quad (39)$$

$$IAF_x = IAF_{x-1} + rIAF_{x-1} \quad (40)$$

em que $cIAF_x$ e $sIAF_x$ (d^{-1}) se referem, respectivamente, as taxas de crescimento e senescência foliar no x -ésimo dia após a emergência.

Durante a fase inicial, o crescimento da área foliar é exponencial no tempo, sendo calculado por meio da taxa relativa de crescimento da área foliar $TRCIAF$ ($^{\circ}C \text{ d}^{-1}$) e da temperatura efetiva diária, em um intervalo de tempo ($DELTA$, d).

$$cIAF_x = IAF_x \exp \frac{(TRCIAF \cdot TEF_x \cdot DELTA)^{-1}}{DELTA} \quad (41)$$

Seguindo esta fase, a disponibilidade dos fotoassimilados determina a formação de novas áreas foliares. Neste momento, o crescimento da área foliar é linear, sendo o produto entre a taxa de acúmulo da biomassa seca das folhas, por unidade de área, produzida no x -ésimo dia do ciclo (TBF_x , $g \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) e área foliar específica de novas folhas (AFE , $\text{m}^2 \text{ g}^{-1}$). A área foliar específica funciona como a razão entre a área foliar e biomassa da mesma, e relaciona a recente fração adicionada de área foliar.

$$cIAF_x = AFE \cdot TBF_x \quad (42)$$

Com relação à senescência foliar ($sIAF_x$), a mesma é descrita com base em uma taxa relativa de mortalidade ($TRMF_x$, d^{-1}) elevada ao máximo por: (i) uma taxa relativa de mortalidade devido ao envelhecimento ($TRMFid$, d^{-1}) e (ii) devido o autosombreamento ($TRMFs$, d^{-1}), que ocorre apenas quando o IAF_x supera o IAF crítico ($IAFcr$).

$$sIAF_x = IAF_x \cdot TRMF_x \quad (43)$$

$$TRMF_x = TRMFid_x \quad \text{se } TRMFid_x > TRMFs_x \quad (44)$$

$$TRMF_x = TRMFs_x \quad \text{se } TRMFid_x \leq TRMFs_x \quad (45)$$

Os valores diários de radiação fotossinteticamente ativa interceptada ($RFAint_x$, $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) são derivados assumindo que a interceptação de radiação aumenta com o aumento do IAF de acordo a uma função exponencial negativa do índice de área foliar, caracterizada pelo coeficiente específico de extinção de luminosa, k . Então, a $RFAint_x$

depende da radiação solar incidente e do IAF, de acordo com a lei de Beer–Bouguer–Lambert.

$$RFAint_x = f \cdot Q_{g_x} \left[1 - \exp^{(-kIAF_x)} \right] \quad (46)$$

em que Q_{g_x} refere-se a radiação solar global ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$); k o coeficiente de extinção luminoso (adimensional); e f é a relação entre a radiação fotossinteticamente ativa e a radiação global (neste trabalho foi utilizado $f=0,5$).

A taxa de acúmulo da biomassa seca total da cultura no x -ésimo dia do ciclo ($TBST_x$, g (matéria seca) $\text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$) é então calculada multiplicando $RFAint_x$ pela eficiência no uso da radiação (EUR , g (matéria seca) MJ^{-1}) constante.

$$TBST_x = EURRFAint_x \quad (47)$$

A ordem de aparição dos vários órgãos em uma planta é uma característica genética; contudo, o momento e a taxa dessa aparição dependem das condições ambientais e é altamente variável.

A fração de biomassa alocada para os diferentes órgãos da planta é obtida, no modelo, por meio da interpolação linear entre os coeficientes fixos de partição, definidos em função do desenvolvimento fenológico. A biomassa seca (g m^{-2}) dos diferentes órgãos é obtida integrando suas respectivas taxas de incremento.

Para cálculo da produtividade potencial dos colmos de cana-de-açúcar (PP , kg ha^{-1}) tem-se:

$$TBC_x = TBST_x \cdot CPC \quad (48)$$

$$PP_j = \frac{1}{1000} \cdot \sum_{x=1}^j TBC_x \quad (49)$$

em que TBC_x é a taxa de acúmulo de biomassa seca nos colmos do x -ésimo dia ($\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$); e CPC é o coeficiente de partição de fotoassimilados para o colmo, nos diferentes estádios de desenvolvimento fenológico da cultura. Os cálculos de PP e PD têm como base a biomassa seca produzida e, no momento da colheita, considerou-se um teor de água de 70% (PP_u e PD_u).

4.6.2 Estimação da produtividade deplecionada em função da disponibilidade hídrica

Tem-se por definição que a evapotranspiração potencial (ETp) e a evapotranspiração real (ETr) são características de uma extensa superfície com vegetação rasteira, em crescimento ativo, cobrindo totalmente o solo, com altura entre 8 e 15 cm ($IAF \approx 3$),

respectivamente, sem e com restrição hídrica (ALLEN et al., 1998). Já a ET_c é a evapotranspiração potencial de uma cultura em dada fase de seu desenvolvimento, sem restrição hídrica, em ótimas condições de crescimento e com ampla área de bordadura para evitar a advecção de calor sensível de áreas adjacentes.

Pela dificuldade em medir ET_c , seu cálculo é feito seguindo a proposição de Jensen (1968), que considera a ET_0 (ET_p para gramado) corrigida por um coeficiente de cultura K_c , sendo:

$$ET_{c_i} = K_{c_i} \cdot ET_{0_i} \quad (50)$$

O cálculo da ET_0 foi realizado pelo método proposto por Thornthwaite (1948) e corrigido para um mês de ND dias e fotoperíodo N ($h\ d^{-1}$), conforme equação 51. Conforme Medeiros (2002), o valor de ET_0 depende da temperatura média do ar T e, portanto, quando $0 \leq T < 26,5^\circ C$ tem-se:

$$ET_{0_x} = 16 \left(10 \frac{T_x}{I} \right)^a \cdot \frac{N_x}{12} \cdot \frac{ND_x}{30} \quad (51)$$

em que N é o comprimento do dia ($h\ d^{-1}$), ND é o número de dias do período em questão e T é a temperatura média do x -ésimo período e I e a são os parâmetros da equação. Segundo Pereira et al. (1997), o valor de I (índice térmico que expressa a quantidade de calor disponível na região) depende do ritmo anual da temperatura, sendo assim calculado:

$$I = \sum_{m=1}^{12} (0,2.T)^{1,514} \quad (52)$$

$$a = 6,75 \times 10^{-7} \cdot I^3 - 7,71 \times 10^{-5} \cdot I^2 + 1,792 \times 10^{-2} \cdot I + 0,49239 \quad (53)$$

No caso de $T \geq 26,5^\circ C$, a ET_0 foi calculada por:

$$ET_{0_x} = -415,85 + 32,24.T - 0,43.T^2 \quad (54)$$

Quanto ao cálculo do balanço hídrico sequencial diário, adotou-se o procedimento proposto por Thornthwaite e Mather (1955), onde o suprimento natural de água ao solo é determinado pela precipitação (P), pela demanda atmosférica, expressa pela evapotranspiração potencial da cultura (ET_c), e pelo nível máximo de armazenamento ou capacidade de água disponível (CAD). Este balanço fornece estimativas da evapotranspiração real (ET_r), da deficiência hídrica (DEF), do excedente hídrico (EXC) e do armazenamento de água no solo (ARM), em escala diária.

Para o início do balanço hídrico determinou-se os valores de negativos acumulados ($Neg. Acum._x$) e do armazenamento (ARM_x) “simultaneamente” e da seguinte forma: quando a

diferença entre a precipitação do dia (P) e a evapotranspiração da cultura (ET_c) foi menor que zero, calculou-se o negativo acumulado (somatório da sequência de valores negativos de $P-ET_c$) e, posteriormente, calculou-se o valor de armazenamento da seguinte forma:

$$Arm_x = CAD.e^{\left| \frac{-Neg.Acum_x}{CAD} \right|} \quad (55)$$

No caso contrário, somou-se o valor positivo de $P-ET_c$ ao ARM do dia anterior, obtendo-se o ARM do dia em questão (não deve ultrapassar o valor de CAD). Com esse valor de ARM calculou-se o $Neg.Acum_x$ pela inversão da equação acima:

$$Neg.Acum_x = -CAD.\ln\left(\frac{Arm_x}{CAD}\right) \quad (56)$$

sendo a CAD (mm) calculada por:

$$CAD = 0,01.(U_{CC} - U_{PMP})d.z \quad (57)$$

em que $U_{CC}\%$ se refere ao teor de água, a base de massa ($g\ g^{-1}$) a capacidade de campo (0,25); $U_{PMP}\%$ ao ponto de murcha permanente (0,125), d é a densidade do solo¹ e z a profundidade do sistema radicular (100 cm) (adaptado de KLAR, 1992).

Posteriormente calculou-se a alteração no armazenamento (Alt - armazenamento atual menos o armazenamento anterior), e a evapotranspiração real (ET_r , $mm\ d^{-1}$), com as seguintes condições para seu cálculo:

$$Quando(P - ET_0) \geq 0 \quad ET_r = ET_c \quad (58)$$

$$Quando(P - ET_0) < 0 \quad ET_r = P + |Alt| \quad (59)$$

A produtividade deplecionada (PD) foi estimada pelo modelo em função da produtividade potencial (PP) e do *deficit* hídrico relativo ($1 - ET_r/ET_c$), que ocorre de acordo com a sensibilidade ao estresse hídrico (K_y) em cada fase do desenvolvimento.

Assim, conhecendo-se a relação ET_r/ET_c , PP ($kg\ ha^{-1}$) e K_y , foi possível determinar a produtividade deplecionada (PD , $kg\ ha^{-1}$) da cultura, a partir da seguinte relação:

$$PD_j = \prod_{i=1}^j \left\{ PP_x \left[1 - ky_x \cdot \left(1 - \frac{ET_{r_x}}{ET_{c_x}} \right) \right] \right\} \quad (60)$$

¹ Quando CC e PMP são dados em % volume é desnecessário incorporar o valor de d no cálculo da CAD (equação 57), pois esse termo já está implícito no volume de solo.

4.6.3 Estimação da Pol, do período útil de industrialização e da máxima produtividade de sacarose

Adaptou-se ao modelo a curva de maturação da variedade cultivada RB867515 (Figura 10), cujos valores temporais de p foram obtidos por meio de estudo conduzido pela RIDESA e Universidade de São Carlos (RIDESA, 2008), a partir de observações de técnicos de 135 empresas conveniadas; portanto, refere-se a uma curva de maturação “média” para este genótipo.

Para tanto, foram adotados os seguintes critérios: (i) determinada variedade cultivada de cana-de-açúcar está apta a ser colhida a partir do momento (t) em que a p for igual p padrão; (ii) a curva de maturação é específica por variedade cultivada e ambiente de produção, sendo esta entendida como “subsídio” para determinar a ordem de grandeza em termos de p e período de ocorrência da produção de açúcar (variação temporal); (iii) pra a cana de ano (plantio de um de setembro a 15 de dezembro) a idade mínima para o cálculo da p foi de 180 dias, enquanto que para a cana de ano e meio e também a de inverno (plantio de 16 de dezembro a 31 de agosto), a idade mínima para cálculo da p foi de 270 dias; (iv) para esta variedade cultivada, o acúmulo da p só ocorre no período entre 30/3 e 15/12, sendo mantido basal (até 4%) nos meses que antecedem a curva; (v) o valor da Pol crítico (p_c) pode ser determinado por variedade, ambiente de produção e ano.

Figura 10 - Modelo [$p = a.t^2 + b.t^{1,5} + c.t + d.t^{0,5} + e$] referente à curva de maturação de cana-de-açúcar, variedade cultivada RB867515 ($R^2 = 0,98356$; $R^2(\text{ajustado}) = 0,98309$; a (-0,031163809), b (1,7018934), c (-34,640126), d (312,3068) e e (-1043,0838)

Sendo assim, o cálculo do p em função do tempo foi estimado com base na equação abaixo:

$$p = a.t^2 + b.t^{1,5} + c.t + d.t^{0,5} + e \quad (61)$$

em que a (-0,031163809), b (1,7018934), c (-34,640126), d (312,3068) e e (-1043,0838) se referem aos parâmetros empíricos do modelo e t se refere ao número de ordem do dia do ano.

Para definir o dia a partir do qual pode ser efetuada a colheita, estipulou-se o p_c de 12,257% (este valor pode ser outro, em função do critério do usuário). Sendo assim, tem-se que:

$$a.t^2 + b.t^{1,5} + c.t + d.t^{0,5} + e - p_c = 0 \quad (62)$$

Fazendo:

$$e = \alpha - p_c \quad (63)$$

tem-se que:

$$a.t^2 + b.t^{1,5} + c.t + d.t^{0,5} + e = 0 \quad (64)$$

Fazendo:

$$w^3 = t^{1,5} \quad (65)$$

consequentemente:

$$w^4 = t^2 \quad (66)$$

$$w^2 = t \quad (67)$$

$$w = t^{0,5} \quad (68)$$

Reescrevendo a equação (64) de forma conveniente, tem-se:

$$a.w^4 + b.w^3 + c.w^2 + d.w + e = 0 \quad (69)$$

Portanto, as quatro raízes podem assim serem calculadas para definirem os momentos de iniciar (t_i) (momento 1) e finalizar (t_f) (momento 2) (Figura 11) a colheita:

$$t_1 = w_1^2 \quad (70)$$

$$t_2 = w_2^2 \quad (71)$$

$$t_3 = w_3^2 \quad (72)$$

$$t_4 = w_4^2 \quad (73)$$

em que:

$$w_1 = \frac{\left\{ \frac{b}{4a} - \frac{1}{2} \left[\frac{\frac{b^2}{4a^2} - \frac{2c}{3a} + \frac{2^{1/3}(c^2 - 3bd + 12ae)}{\left(2c^3 - 9bcd + 27ad^2 + 27b^2e - 72ace + 3a \left[\frac{-4(c^2 - 3bd + 12ae)^3 + (2c^3 - 9bcd + 27ad^2 + 27b^2e - 72ace)^2 \right]^{1/2}} \right)^{1/3}} \right]^{1/2} \right\}^{1/2} - \frac{1}{2} \left\{ \frac{\frac{b^2}{2a^2} - \frac{4c}{3a} + \frac{2^{1/3}(c^2 - 3bd + 12ae)}{\left(2c^3 - 9bcd + 27ad^2 + 27b^2e - 72ace + 3a \left[\frac{-4(c^2 - 3bd + 12ae)^3 + (2c^3 - 9bcd + 27ad^2 + 27b^2e - 72ace)^2 \right]^{1/2}} \right)^{1/3}} \right\}^{1/2} - \left(-\frac{b^3}{a^3} + \frac{4bc}{a^2} - \frac{8d}{a} \right) \right\}}{\left\{ \frac{b^2}{4a^2} - \frac{2c}{3a} + \frac{2^{1/3}(c^2 - 3bd + 12ae)}{\left(2c^3 - 9bcd + 27ad^2 + 27b^2e - 72ace + 3a \left[\frac{-4(c^2 - 3bd + 12ae)^3 + (2c^3 - 9bcd + 27ad^2 + 27b^2e - 72ace)^2 \right]^{1/2}} \right)^{1/3}} \right\}^{1/2} + \left\{ \frac{b^2}{2a^2} - \frac{4c}{3a} + \frac{2^{1/3}(c^2 - 3bd + 12ae)}{\left(2c^3 - 9bcd + 27ad^2 + 27b^2e - 72ace + 3a \left[\frac{-4(c^2 - 3bd + 12ae)^3 + (2c^3 - 9bcd + 27ad^2 + 27b^2e - 72ace)^2 \right]^{1/2}} \right)^{1/3}} \right\}^{1/2} - \left(-\frac{b^3}{a^3} + \frac{4bc}{a^2} - \frac{8d}{a} \right) \right\}^{1/2}} \quad (74)$$

$$\begin{aligned}
& \left. -\frac{b}{4a} - \frac{1}{2} \left\{ \frac{\frac{b^2}{4a^2} - \frac{2c}{3a} + \frac{2^{1/3}(c^2 - 3bd + 12ae)}{\left(\frac{2c^3 - 9bcd + 27ad^2 + 27b^2e - 72ace + 3a \left[-4(c^2 - 3bd + 12ae)^3 + (2c^3 - 9bcd + 27ad^2 + 27b^2e - 72ace)^2 \right]^{1/2}} \right)^{1/3}}}{\frac{32^{1/3}a}{\left(\frac{2c^3 - 9bcd + 27ad^2 + 27b^2e - 72ace + \left[-4(c^2 - 3bd + 12ae)^3 + (2c^3 - 9bcd + 27ad^2 + 27b^2e - 72ace)^2 \right]^{1/2}} \right)^{1/3}}} \right\}^{1/2} + \right. \\
& \left. \frac{1}{2} \left\{ \frac{\frac{b^2}{2a^2} - \frac{4c}{3a} + \frac{2^{1/3}(c^2 - 3bd + 12ae)}{\left(\frac{2c^3 - 9bcd + 27ad^2 + 27b^2e - 72ace + 3a \left[-4(c^2 - 3bd + 12ae)^3 + (2c^3 - 9bcd + 27ad^2 + 27b^2e - 72ace)^2 \right]^{1/2}} \right)^{1/3}}}{\frac{32^{1/3}a}{\left(\frac{2c^3 - 9bcd + 27ad^2 + 27b^2e - 72ace + \left[-4(c^2 - 3bd + 12ae)^3 + (2c^3 - 9bcd + 27ad^2 + 27b^2e - 72ace)^2 \right]^{1/2}} \right)^{1/3}}} \right\}^{1/2} - \right. \\
& \left. \left(-\frac{b^3}{a^3} + \frac{4bc}{a^2} - \frac{8d}{a} \right) \right\} \\
w_2 = & \frac{\left(-\frac{b^3}{a^3} + \frac{4bc}{a^2} - \frac{8d}{a} \right)}{4 \left\{ \frac{\frac{b^2}{4a^2} - \frac{2c}{3a} + \frac{2^{1/3}(c^2 - 3bd + 12ae)}{\left(\frac{2c^3 - 9bcd + 27ad^2 + 27b^2e - 72ace + 3a \left[-4(c^2 - 3bd + 12ae)^3 + (2c^3 - 9bcd + 27ad^2 + 27b^2e - 72ace)^2 \right]^{1/2}} \right)^{1/3}}}{\frac{32^{1/3}a}{\left(\frac{2c^3 - 9bcd + 27ad^2 + 27b^2e - 72ace + \left[-4(c^2 - 3bd + 12ae)^3 + (2c^3 - 9bcd + 27ad^2 + 27b^2e - 72ace)^2 \right]^{1/2}} \right)^{1/3}}} \right\}^{1/2}}
\end{aligned} \tag{75}$$

$$\begin{aligned}
& \left. \left. \left. \frac{b^2}{4a^2} - \frac{2c}{3a} + \frac{2^{1/3}(c^2 - 3bd + 12ae)}{\left(\frac{2c^3 - 9bcd + 27ad^2 + 27b^2e - 72ace + 3a \left[-4(c^2 - 3bd + 12ae)^3 + (2c^3 - 9bcd + 27ad^2 + 27b^2e - 72ace)^2 \right]^{1/2} \right)^{1/3}} \right)^{1/3} + \right\}^{1/2} \right. \\
& \left. \left. \left. \frac{b}{4a} - \frac{1}{2} \right\} \left(\frac{2c^3 - 9bcd + 27ad^2 + 27b^2e - 72ace + \left[-4(c^2 - 3bd + 12ae)^3 + (2c^3 - 9bcd + 27ad^2 + 27b^2e - 72ace)^2 \right]^{1/2}}{32^{1/3}a} \right)^{1/3} \right\} - \\
& \left. \left. \left. \frac{1}{2} \right\} \left(\frac{2c^3 - 9bcd + 27ad^2 + 27b^2e - 72ace + \left[-4(c^2 - 3bd + 12ae)^3 + (2c^3 - 9bcd + 27ad^2 + 27b^2e - 72ace)^2 \right]^{1/2}}{32^{1/3}a} \right)^{1/3} \right\} + \\
& \left. \left. \left. \left(-\frac{b^3}{a^3} + \frac{4bc}{a^2} - \frac{8d}{a} \right) \right\} \left(\frac{2c^3 - 9bcd + 27ad^2 + 27b^2e - 72ace + \left[-4(c^2 - 3bd + 12ae)^3 + (2c^3 - 9bcd + 27ad^2 + 27b^2e - 72ace)^2 \right]^{1/2}}{32^{1/3}a} \right)^{1/3} \right\} \right. \\
& w_3 = \frac{\left(-\frac{b^3}{a^3} + \frac{4bc}{a^2} - \frac{8d}{a} \right)}{4 \left\{ \left(\frac{2c^3 - 9bcd + 27ad^2 + 27b^2e - 72ace + \left[-4(c^2 - 3bd + 12ae)^3 + (2c^3 - 9bcd + 27ad^2 + 27b^2e - 72ace)^2 \right]^{1/2}}{32^{1/3}a} \right)^{1/3} \right\}^{1/2}}
\end{aligned} \tag{76}$$

$$\begin{aligned}
& \left. -\frac{b}{4a} - \frac{1}{2} \left\{ \frac{\frac{b^2}{4a^2} - \frac{2c}{3a} + \frac{2^{1/3}(c^2 - 3bd + 12ae)}{\left(\frac{2c^3 - 9bcd + 27ad^2 + 27b^2e - 72ace + 3a \left[-4(c^2 - 3bd + 12ae)^3 + (2c^3 - 9bcd + 27ad^2 + 27b^2e - 72ace)^2 \right]^{1/2}} \right)^{1/3}}}{32^{1/3}a} \right\}^{1/2} \right. \\
& \left. + \frac{1}{2} \left\{ \frac{\frac{b^2}{2a^2} - \frac{4c}{3a} + \frac{2^{1/3}(c^2 - 3bd + 12ae)}{\left(\frac{2c^3 - 9bcd + 27ad^2 + 27b^2e - 72ace + 3a \left[-4(c^2 - 3bd + 12ae)^3 + (2c^3 - 9bcd + 27ad^2 + 27b^2e - 72ace)^2 \right]^{1/2}} \right)^{1/3}}}{32^{1/3}a} \right\}^{1/2} \right. \\
& \left. + \left(-\frac{b^3}{a^3} + \frac{4bc}{a^2} - \frac{8d}{a} \right) \right\}^{1/2} \\
w_4 = & \frac{\left(-\frac{b^3}{a^3} + \frac{4bc}{a^2} - \frac{8d}{a} \right)}{4 \left\{ \frac{\frac{b^2}{4a^2} - \frac{2c}{3a} + \frac{2^{1/3}(c^2 - 3bd + 12ae)}{\left(\frac{2c^3 - 9bcd + 27ad^2 + 27b^2e - 72ace + 3a \left[-4(c^2 - 3bd + 12ae)^3 + (2c^3 - 9bcd + 27ad^2 + 27b^2e - 72ace)^2 \right]^{1/2}} \right)^{1/3}}}{32^{1/3}a} \right\}^{1/2}}
\end{aligned} \tag{77}$$

Figura 11 - Modelo referente à curva de maturação de cana-de-açúcar (**p**: Pol% cana. **p_c** : valor crítico da Pol – 12,257% {ordem de grandeza}. **PUI**: período útil de industrialização - colheita ocorre entre os momentos de valores de Pol superiores ao valor mínimo aceito { p_c }, que ocorre nos momentos 1 { t_i : momento referente ao início do período de colheita} e 2 { t_f : momento referente ao final do período de colheita}, para definir o início do período de colheita. **PUIo**: período otimizado – colheita ocorre entre o momento de máxima produtividade de sacarose [momento 4 – qualquer momento entre os momentos 1 e 2] e máximo Pol [t_o] [momento 3]. **p_m** : valor máximo da Pol [%]. **f**: fração do valor máximo da Pol. **PUIIm**: período útil de industrialização com valores máximos da Pol)

Portanto, para o cálculo do período útil de industrialização (**PUI**), tem-se que:

$$PUI = t_f - t_i \quad (78)$$

Para determinação do valor máximo da Pol (**p_m** , %), tem-se que:

$$\frac{dp}{dt} = 2.a.t + \frac{3.b.t^{0,5}}{2} + c + \frac{d}{2.t^{0,5}} = 0 \quad (79)$$

$$4.a.t + 3.b.t^{0,5} + 2c + \frac{d}{t^{0,5}} = 0 \quad (80)$$

$$4.a.t^{1,5} + 3.b.t + 2c.t^{0,5} + d = 0 \quad (81)$$

Fazendo:

$$w^3 = t^{1,5} \quad (82)$$

consequentemente:

$$w^2 = t \quad (83)$$

$$w = t^{0,5} \quad (84)$$

tem-se que:

$$4.a.w^3 + 3.b.w^2 + 2.c.w + d = 0 \quad (85)$$

Portanto, o momento de colheita (t_o) correspondente ao máximo valor da Pol (pm) (momento 3) (Figura 10):

$$t_o = \left\{ \frac{\left(\frac{-54b^3 + 216abc - 432a^2d + \left[4(-9b^2 + 24ac)^3 + (-54b^3 + 216abc - 432a^2d)^2 \right]^{1/2}}{2048^{1/3}a} \right)^{1/3} - \frac{b}{12a} - \frac{2^{1/3}(-9b^2 + 24ac)}{3a \left(\frac{-1458b^3 + 216abc - 432a^2d + \left[4(-9b^2 + 24ac)^3 + (-1458b^3 + 216abc - 432a^2d)^2 \right]^{1/2}}{2048^{1/3}a} \right)^{1/3}}{2} \right\}^2 \quad (86)$$

Para o cálculo do período útil de industrialização que maximiza ($PUIm$) os valores da Pol na colheita da cana planta, tem-se que:

$$PUIm = t_{3f} - t_{3i} \quad (87)$$

em que t_{3f} e t_{3i} se referem aos dias que inicia e finaliza o período útil de industrialização com valores máximos de Pol (ou momentos com menor valor de Pol $-f.p_M \{0,85 < f < 0,95\}$ - no período considerado - $PUIm$).

Para o cálculo dos valores de t_{3f} e t_{3i} , utiliza-se procedimento análogo (equações 70 a 77) ao cálculo de t_f e t_i , fazendo $e = \alpha - f.p_M$

Para o cálculo do período otimizado útil de industrialização ($PUIo$) que maximiza a produtividade de sacarose da cana planta, tem-se que:

$$PUIo = |t_4 - t_o| \quad (88)$$

Para o cálculo do valor de t_4 , utiliza-se o seguinte procedimento: definir-se-á o momento (t_4) correspondente à máxima produtividade de sacarose (TPH) da cultura de cana-de-açúcar, quando o valor de TPH for máximo (TPH_{max} , kg ha⁻¹), sendo que:

$$TPH_{\max} = \frac{p_{t_4}}{100} \cdot \frac{BSC_{t_4}}{0,3} \quad (89)$$

ou

$$TPH_{\max} = \frac{(a.t_4^2 + b.t_4^{1,5} + c.t_4 + d.t_4^{0,5} + \alpha)}{100} \cdot \sum_{t=1}^{t_4} \frac{BSC_t}{0,3} \quad (90)$$

em que p se refere a Pol (%) e BSC à biomassa seca de colmo (kg ha^{-1}) - corrigido para 70% de umidade.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Teste de aderência

A probabilidade de ocorrência de um evento pode ser definida como o somatório das frequências relativas esperadas de casos favoráveis à ocorrência desse fenômeno (HOEL, 1968). Em estudos climatológicos é comum a utilização de histogramas de amostras de dados para realizar inferências sobre uma população desconhecida, contudo, o fato de um evento não ser registrado em uma amostra não significa que ele não esteja contido na população. Nesses casos, a distribuição empírica não reflete todas as possíveis sucessões das condições de tempo locais, fazendo-se necessário o uso de distribuições teóricas paramétricas (DALE 1968), cujos atributos específicos dependem dos valores numéricos de seus parâmetros.

O tratamento estatístico dos elementos do clima observados ao longo do tempo, determinando seus padrões de ocorrência e propiciando uma adequada previsibilidade do padrão do tempo e clima de uma região, é um instrumento de grande valia no planejamento e na gestão de inúmeras atividades agrícolas, agropecuárias e humanas. Estes modelos, quando bem ajustados, resultam em maior embasamento estatístico da descrição climática (SANSIGOLO; NERY, 2000), e nos permitem realizar estimativas sem precisar da totalidade de informações.

O conhecimento do desempenho da temperatura média é fundamental para a caracterização da adaptabilidade de instalação de uma cultura em uma determinada região, considerando que os processos biofísicos e bioquímicos condicionantes do metabolismo dos seres vivos são afetados pelas condições energéticas do ambiente, sendo as condições de atmosfera e solo as mais importantes. Neste sentido, ressalta-se que os estudos envolvendo temperatura do ar, principalmente no que diz respeito à utilização de séries históricas diárias, são dificultados em sua maioria pela reduzida disponibilidade de dados (DOURADO NETO et al., 2005a), que segundo Araújo et al. (2007), são frequentemente relacionados a estudos envolvendo a estimativa de evapotranspiração.

Martin (2007), em análise dos dados históricos diários de 23 estações no estado de São Paulo, reportou, para a variável temperatura média do ar, que as distribuições de probabilidade log-normal, gama e Weibull apresentaram ajustamento aos dados em 98,59%, 96,62% e 96,96%, respectivamente, sendo que a distribuição normal apresentou destaque sobre as demais, a um nível de significância de 5%.

Assis et al. (2006), em estudo sobre dados climáticos simulados e produtividade potencial de milho, verificaram que, em escala diária, a função densidade de probabilidade normal é adequada para representar a distribuição das variáveis temperatura média diária e radiação solar global diária, em Piracicaba (SP).

Assis et al. (2004) reportaram que, para as estimativas diárias da variável temperatura média do ar, a distribuição normal possui destaque sobre a distribuição log-normal. Além disso, os mesmos autores indicam que o teste de Kolmogorov-Smirnov pode ser recomendado para verificar o ajuste de uma distribuição estimada a dados observados de temperatura média do ar e radiação solar.

Silva et al. (2005), usando a distribuição t , construíram tabelas de probabilidade de ocorrência da temperatura máxima em escala pentadal na cidade de Pelotas-RS, que servem de subsídios para o planejamento agrícola da região.

Hoffmann et al. (1994), objetivando a obtenção da estimativa da primeira data do outono e última data da primavera com temperatura do ar menor ou igual a 0°C em Pelotas (RS), concluíram, após aplicação dos testes do Qui-quadrado e Kolmogorov-Smirnov, que a distribuição de frequência das datas - tanto da primavera quanto da última ocorrência - segue a distribuição normal. Por intermédio dos valores de temperatura média do ar e desvio padrão mensal é possível estimar, com certo nível de precisão, a probabilidade de uma dada temperatura ocorrer.

Sediyama et al. (1978) utilizaram modelos de função de distribuição de probabilidade para simulação de parâmetros climáticos para época de crescimento das plantas. O procedimento para simular o valor aleatório da quantidade de chuva diária X foi feito por meio da função de densidade gama incompleta; já a temperatura média diária foi simulada por meio da distribuição normal e a umidade relativa foi ajustada pela função de distribuição de densidade beta.

Os parâmetros das distribuições normal (média e desvio padrão), gama (alfa e λ) e Weibull (alfa e beta), bem como seus respectivos **valores p** referentes aos ajustes das distribuições à temperatura média do ar para cada dia do ano são apresentados nas Tabelas 1 a 12. Ressalta-se que o “valor p” é um nível descritivo muito utilizada para sintetizar o resultado de um teste de hipóteses e significa a probabilidade de que a estatística do teste (como variável aleatória) tenha valor extremo em relação ao valor observado (estatística), quando a hipótese H_0 é verdadeira. Neste teste, o nível de significância é a probabilidade máxima de rejeitar acidentalmente a hipótese base verdadeira (H_0) (erro do tipo I). Portanto,

quando o valor p é menor que o nível de significância proposto (α), o valor observado está na região crítica e, portanto, rejeita-se a hipótese nula H_0 ; por outro lado, se o valor p é maior que o nível de significância, não se rejeita H_0 . Para fins de análise e simulação, adotou-se como critério de não rejeição de H_0 um valor p maior ou igual a 0,05 pelo teste de Kolmogorov-Smirnov tido, estatisticamente, como nível significativo.

Sendo assim, pode-se afirmar que, para a variável temperatura média do ar, as três distribuições apresentaram aderência satisfatória aos dados diários, com melhor desempenho da distribuição normal (99,45% de aderência), seguida pela distribuição Weibull (98,63%) e gama (97,53%). Observa-se, também, que os dados apresentaram uma forte simetria e homogeneidade no decorrer do ano, dado o nível de significância mencionado.

Por meio do valor p verifica-se a qualidade dos ajustes sendo que, para a distribuição normal, apenas os dias 16/1, 1/2, 10/3, 26/3, 14/5, 31/7 e 9/8 tiveram valores abaixo de 0,1. Não houve aderência da distribuição normal aos dados dos dias 27/8 e 11/11 enquanto a distribuição Weibull não apresentou ajuste aos dados dos dias 15/1, 2/2, 3/3, 13/4 e 27/8. Observou-se, para a distribuição gama, que o ajuste não foi positivo nos meses mais secos do ano (14/5, 19/6, 20/6, 26/6, 6/7, 31/7, 1/8, 9/8 e 27/8).

Quanto aos valores dos parâmetros, têm-se para a distribuição normal que as menores médias diárias de temperatura média do ar (abaixo de 17°C) ocorreram entre os dias 10 e 13/7, enquanto que as maiores (acima de 24°C), nos meses de janeiro, fevereiro e maior parte de março. O desvio padrão oscilou entre 1,35°C e 3,31°C, com média de 2,29°C.

Os parâmetros da distribuição gama têm valores mínimo, médio e máximo de 26,63, 105,51 e 326,10, respectivamente, para forma (α), e de 1,43, 4,65 e 13,25, respectivamente, para taxa (λ). Na distribuição Weibull, observa-se para o parâmetro de forma (α), 6,17, 11,60 e 20,53, respectivamente, valores mínimo, médio e máximo, e para a escala (β), 17,66, 22,59 e 25,74. De maneira geral, observa-se que os valores destes parâmetros são menores nos meses mais frios do ano (junho, julho e agosto) e maiores nos meses mais quentes (dezembro a março).

Para a variável temperatura média do ar tem-se, portanto, que as três distribuições analisadas obtiveram ajustes bastante satisfatórios aos dados diários das séries históricas, ou seja, são adequadas para representar o padrão de ocorrência desta variável em Piracicaba, SP.

Tabela 1 - Valores das estimativas dos parâmetros média (μ) e desvio padrão (σ) para a distribuição normal, forma (α) e taxa (λ) para a distribuição gama e forma (α) e escala (β) para a distribuição Weibull, com seus respectivos “valor p” do teste de aderência (Kolmogorov-Smirnov). Valores referentes à análise estatística para a série histórica diária de temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$) em Piracicaba (SP). Série histórica: 94 anos, mês: Janeiro

Dia	Normal			Gama			Weibull		
	μ	σ	valor p	$\alpha(\text{forma})$	$\lambda(\text{taxa})$	valor p	$\alpha(\text{forma})$	$\beta(\text{escala})$	valor p
1-Jan	24,27	1,74	0,994	193,300	7,963	0,966	14,916	25,075	0,490
2-Jan	24,31	1,93	0,565	157,072	6,461	0,408	14,694	25,168	0,725
3-Jan	24,15	2,07	0,898	133,980	5,548	0,775	13,962	25,055	0,861
4-Jan	24,12	1,90	0,332	159,652	6,619	0,235	14,425	24,969	0,341
5-Jan	24,24	1,91	0,149	159,602	6,585	0,104	14,630	25,096	0,709
6-Jan	24,44	1,85	0,920	173,114	7,082	0,814	14,771	25,289	0,702
7-Jan	24,65	1,84	0,561	177,661	7,206	0,414	15,962	25,478	0,995
8-Jan	24,39	2,10	0,542	132,841	5,446	0,377	13,979	25,309	0,871
9-Jan	24,62	2,09	0,315	137,476	5,583	0,209	14,641	25,528	0,980
10-Jan	24,65	2,08	0,462	138,644	5,625	0,318	14,313	25,557	0,982
11-Jan	24,28	1,78	0,141	183,268	7,548	0,093	17,701	25,051	0,620
12-Jan	24,34	1,67	0,829	210,364	8,643	0,695	17,644	25,082	0,997
13-Jan	24,44	1,78	0,557	186,204	7,619	0,460	17,311	25,214	0,990
14-Jan	24,69	1,87	0,521	171,849	6,961	0,402	15,927	25,509	0,652
15-Jan	24,60	1,94	0,726	159,285	6,475	0,628	14,601	25,474	0,032*
16-Jan	24,57	1,97	0,089	153,231	6,236	0,053	14,660	25,434	0,212
17-Jan	24,43	1,91	0,273	161,026	6,590	0,184	13,872	25,306	0,437
18-Jan	24,65	1,79	0,792	187,237	7,597	0,900	14,527	25,488	0,487
19-Jan	24,54	1,71	0,866	203,916	8,311	0,953	15,487	25,335	0,475
20-Jan	24,39	1,82	0,966	177,400	7,272	0,882	14,362	25,235	0,467
21-Jan	24,55	1,83	0,273	178,191	7,258	0,184	15,809	25,367	0,706
22-Jan	24,54	1,82	0,409	180,544	7,356	0,311	16,506	25,342	0,989
23-Jan	24,52	1,66	0,869	216,011	8,811	0,751	17,295	25,263	0,899
24-Jan	24,65	1,78	0,933	189,626	7,692	0,902	16,323	25,445	0,652
25-Jan	24,47	1,86	0,794	171,930	7,025	0,704	15,583	25,288	0,630
26-Jan	24,26	2,03	0,875	141,457	5,832	0,787	13,931	25,162	0,958
27-Jan	24,34	1,86	0,774	168,464	6,922	0,662	14,427	25,188	0,557
28-Jan	24,38	1,82	0,466	177,375	7,275	0,343	14,887	25,206	0,662
29-Jan	24,57	1,80	0,311	183,585	7,473	0,216	15,990	25,378	0,634
30-Jan	24,59	1,81	0,910	181,796	7,394	0,893	15,597	25,409	0,277
31-Jan	24,81	1,69	0,358	212,048	8,547	0,258	16,869	25,572	0,847

*Rejeita-se H_0 a um nível de significância de 0,05.

Tabela 2 - Valores das estimativas dos parâmetros média (μ) e desvio padrão (σ) para a distribuição normal, forma (α) e taxa (λ) para a distribuição gama e forma (α) e escala (β) para a distribuição Weibull, com seus respectivos “valor p” do teste de aderência (Kolmogorov-Smirnov). Valores referentes à análise estatística para a série histórica diária de temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$) em Piracicaba (SP). Série histórica: 94 anos, mês: 94 anos, mês: Fevereiro

Dia	Normal			Gama			Weibull		
	μ	σ	valor p	$\alpha(\text{forma})$	$\lambda(\text{taxa})$	valor p	$\alpha(\text{forma})$	$\beta(\text{escala})$	valor p
1-Fev	24,64	1,89	0,098	167,887	6,813	0,059	16,881	25,453	0,801
2-Fev	24,87	1,88	0,132	172,798	6,947	0,082	16,749	25,688	0,045*
3-Fev	24,68	1,76	0,637	193,953	7,859	0,502	16,028	25,471	0,639
4-Fev	24,74	1,83	0,879	181,099	7,319	0,741	15,724	25,569	0,990
5-Fev	24,70	1,93	0,785	161,085	6,523	0,674	15,009	25,560	0,995
6-Fev	24,68	1,66	0,967	217,258	8,804	0,929	15,732	25,454	0,715
7-Fev	24,52	1,99	0,461	150,801	6,151	0,366	14,598	25,405	0,650
8-Fev	24,62	1,94	0,419	159,994	6,499	0,307	15,066	25,484	0,996
9-Fev	24,49	1,97	0,659	153,234	6,256	0,508	14,780	25,365	0,786
10-Fev	24,54	1,76	0,513	193,311	7,877	0,387	16,652	25,329	0,957
11-Fev	24,64	1,64	0,528	224,159	9,098	0,430	18,056	25,375	0,990
12-Fev	24,93	1,69	0,765	214,653	8,610	0,639	16,535	25,709	0,513
13-Fev	24,67	1,66	0,770	217,445	8,815	0,640	17,052	25,424	0,441
14-Fev	24,66	1,71	0,974	204,786	8,304	0,993	14,495	25,463	0,566
15-Fev	24,77	1,55	0,231	253,558	10,235	0,207	18,327	25,482	0,562
16-Fev	24,88	1,64	0,709	227,015	9,126	0,587	17,211	25,618	0,450
17-Fev	24,94	1,80	0,540	190,772	7,648	0,409	16,718	25,743	0,603
18-Fev	24,77	1,69	0,695	211,477	8,539	0,584	17,011	25,541	0,953
19-Fev	24,87	1,56	0,960	250,905	10,087	0,924	18,065	25,595	0,945
20-Fev	24,64	1,85	0,276	175,777	7,134	0,197	16,004	25,456	0,908
21-Fev	24,67	1,68	0,534	213,417	8,650	0,426	18,107	25,418	0,981
22-Fev	24,63	1,74	0,675	199,079	8,083	0,639	15,726	25,438	0,341
23-Fev	24,75	1,74	0,704	199,362	8,055	0,595	16,076	25,541	0,785
24-Fev	24,72	1,74	0,610	198,918	8,045	0,481	16,566	25,502	0,781
25-Fev	24,69	1,70	0,538	209,385	8,482	0,404	17,314	25,440	0,664
26-Fev	24,59	1,74	0,952	198,003	8,051	0,875	16,248	25,379	0,961
27-Fev	24,67	1,64	0,319	225,011	9,119	0,232	16,825	25,410	0,555
28-Fev	24,65	1,63	0,878	225,786	9,160	0,811	16,468	25,403	0,626

*Rejeita-se H_0 a um nível de significância de 0,05.

Tabela 3 - Valores das estimativas dos parâmetros média (μ) e desvio padrão (σ) para a distribuição normal, forma (α) e taxa (λ) para a distribuição gama e forma (α) e escala (β) para a distribuição Weibull, com seus respectivos “valor p” do teste de aderência (Kolmogorov-Smirnov). Valores referentes à análise estatística para a série histórica diária de temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$) em Piracicaba (SP). Série histórica: 94 anos, mês: 94 anos, mês: Março

Dia	Normal			Gama			Weibull		
	μ	σ	valor p	$\alpha(\text{forma})$	$\lambda(\text{taxa})$	valor p	$\alpha(\text{forma})$	$\beta(\text{escala})$	valor p
1-Mar	24,64	1,69	0,731	210,094	8,528	0,583	16,007	25,407	0,890
2-Mar	24,55	1,50	0,243	266,388	10,852	0,178	18,849	25,223	0,647
3-Mar	24,60	1,35	0,185	326,100	13,254	0,135	19,473	25,236	0,047*
4-Mar	24,54	1,56	0,684	244,416	9,959	0,587	18,228	25,234	0,845
5-Mar	24,64	1,58	0,331	240,121	9,746	0,239	19,506	25,319	0,897
6-Mar	24,65	1,44	0,434	291,725	11,835	0,338	20,530	25,287	0,976
7-Mar	24,38	1,74	0,180	192,298	7,894	0,110	16,148	25,159	0,315
8-Mar	24,44	1,66	0,385	204,340	8,376	0,260	16,398	25,167	0,670
9-Mar	24,45	1,56	0,750	244,412	9,996	0,614	19,309	25,141	0,993
10-Mar	24,59	1,59	0,088	235,933	9,595	0,063	20,041	25,286	0,554
11-Mar	24,37	1,67	0,267	209,477	8,597	0,206	17,957	25,086	0,733
12-Mar	24,53	1,75	0,153	194,645	7,936	0,099	18,636	25,252	0,799
13-Mar	24,43	1,74	0,632	195,192	7,990	0,497	16,837	25,199	0,996
14-Mar	24,46	1,49	0,614	265,329	10,846	0,497	18,589	25,151	0,931
15-Mar	24,36	1,69	0,594	206,617	8,482	0,454	16,320	25,128	0,781
16-Mar	24,34	1,72	0,588	198,327	8,149	0,450	17,409	25,101	0,973
17-Mar	24,02	1,84	0,354	168,410	7,011	0,261	16,766	24,800	0,947
18-Mar	24,16	1,57	0,530	234,370	9,699	0,416	18,680	24,862	0,888
19-Mar	24,03	1,67	0,634	204,180	8,498	0,491	17,613	24,755	0,955
20-Mar	23,78	1,67	0,629	200,231	8,420	0,482	17,046	24,528	0,980
21-Mar	23,59	1,77	0,306	175,781	7,451	0,225	15,238	24,391	0,933
22-Mar	23,62	1,60	0,569	214,533	9,083	0,499	16,865	24,350	0,846
23-Mar	23,79	1,53	0,163	239,313	10,058	0,130	19,095	24,480	0,647
24-Mar	23,99	1,44	0,800	272,926	11,375	0,688	19,244	24,657	0,729
25-Mar	23,89	1,60	0,602	219,936	9,205	0,575	16,965	24,627	0,928
26-Mar	23,73	1,96	0,090	145,396	6,126	0,052	15,651	24,579	0,685
27-Mar	23,57	1,86	0,229	159,344	6,762	0,157	14,667	24,407	0,340
28-Mar	23,63	1,80	0,665	169,492	7,173	0,505	15,840	24,425	0,975
29-Mar	23,75	1,87	0,505	159,620	6,721	0,430	15,543	24,573	0,603
30-Mar	23,64	1,82	0,255	167,215	7,073	0,171	15,966	24,441	0,922
31-Mar	23,69	1,76	0,617	180,092	7,603	0,471	15,757	24,462	0,932

*Rejeita-se H_0 a um nível de significância de 0,05.

Tabela 4 - Valores das estimativas dos parâmetros média (μ) e desvio padrão (σ) para a distribuição normal, forma (α) e taxa (λ) para a distribuição gama e forma (α) e escala (β) para a distribuição Weibull, com seus respectivos “valor p” do teste de aderência (Kolmogorov-Smirnov). Valores referentes à análise estatística para a série histórica diária de temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$) em Piracicaba (SP). Série histórica: 94 anos, mês: 94 anos, mês: Abril

Dia	Normal			Gama			Weibull		
	μ	σ	valor p	$\alpha(\text{forma})$	$\lambda(\text{taxa})$	valor p	$\alpha(\text{forma})$	$\beta(\text{escala})$	valor p
1-Abr	23,45	1,81	0,174	166,624	7,106	0,111	15,755	24,237	0,812
2-Abr	23,00	1,94	0,526	139,383	6,061	0,376	13,838	23,856	0,993
3-Abr	23,07	2,10	0,945	118,817	5,150	0,861	12,648	24,011	0,926
4-Abr	22,78	2,07	0,554	119,747	5,257	0,380	12,690	23,698	0,987
5-Abr	22,82	1,96	0,923	133,737	5,860	0,800	13,704	23,704	0,902
6-Abr	22,85	2,01	0,737	127,864	5,595	0,572	12,801	23,767	0,602
7-Abr	22,83	1,99	0,961	129,614	5,677	0,865	12,880	23,734	0,647
8-Abr	22,67	2,10	0,612	114,748	5,063	0,436	12,656	23,599	0,940
9-Abr	22,67	2,19	0,726	105,751	4,665	0,636	11,818	23,656	0,678
10-Abr	22,78	2,14	0,397	112,007	4,917	0,359	12,350	23,737	0,625
11-Abr	22,55	2,05	0,841	119,526	5,301	0,839	12,047	23,485	0,636
12-Abr	22,39	2,17	0,922	104,856	4,683	0,812	12,534	23,336	0,894
13-Abr	22,21	2,24	0,796	97,366	4,383	0,673	11,837	23,190	0,033*
14-Abr	22,25	2,05	0,837	116,671	5,244	0,658	12,569	23,156	0,403
15-Abr	22,09	2,17	0,999	102,542	4,641	0,992	11,580	23,067	0,638
16-Abr	22,04	2,05	0,966	114,685	5,204	0,884	12,053	22,964	0,813
17-Abr	21,81	2,15	0,792	101,264	4,644	0,652	11,786	22,747	0,959
18-Abr	21,52	2,21	0,892	94,089	4,373	0,700	11,501	22,477	0,971
19-Abr	21,52	2,29	0,886	87,571	4,069	0,711	10,827	22,540	0,955
20-Abr	21,35	2,18	0,896	94,788	4,439	0,756	11,374	22,314	0,549
21-Abr	21,53	2,10	0,569	104,399	4,849	0,655	11,727	22,474	0,463
22-Abr	21,60	2,14	0,649	100,884	4,670	0,646	11,580	22,566	0,583
23-Abr	21,52	2,14	0,993	99,985	4,646	0,917	11,515	22,471	0,917
24-Abr	21,47	2,10	0,982	103,191	4,807	0,938	11,676	22,403	0,783
25-Abr	21,26	2,34	0,682	77,991	3,668	0,429	10,746	22,276	0,986
26-Abr	20,92	2,43	0,423	68,108	3,256	0,215	10,497	21,941	0,889
27-Abr	20,96	2,17	0,296	92,427	4,410	0,180	11,164	21,913	0,476
28-Abr	20,73	2,12	0,730	94,491	4,559	0,588	11,612	21,654	0,922
29-Abr	20,82	2,17	0,975	90,905	4,365	0,844	11,372	21,772	0,990
30-Abr	20,50	2,17	0,979	88,083	4,297	0,864	10,748	21,460	0,869

*Rejeita-se H_0 a um nível de significância de 0,05.

Tabela 5 - Valores das estimativas dos parâmetros média (μ) e desvio padrão (σ) para a distribuição normal, forma (α) e taxa (λ) para a distribuição gama e forma (α) e escala (β) para a distribuição Weibull, com seus respectivos “valor p” do teste de aderência (Kolmogorov-Smirnov). Valores referentes à análise estatística para a série histórica diária de temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$) em Piracicaba (SP). Série histórica: 94 anos, mês: 94 anos, mês: Maio

Dia	Normal			Gama			Weibull		
	μ	σ	valor p	$\alpha(\text{forma})$	$\lambda(\text{taxa})$	valor p	$\alpha(\text{forma})$	$\beta(\text{escala})$	valor p
1-Mai	20,27	2,44	0,717	65,093	3,211	0,492	9,840	21,322	0,568
2-Mai	20,39	2,41	0,664	70,863	3,476	0,541	9,548	21,445	0,830
3-Mai	20,29	2,42	0,734	69,414	3,420	0,499	9,286	21,369	0,675
4-Mai	19,97	2,63	0,632	54,153	2,712	0,424	8,889	21,095	0,772
5-Mai	19,78	2,53	0,499	60,578	3,063	0,382	9,058	20,875	0,819
6-Mai	19,63	2,33	0,426	67,467	3,437	0,244	10,152	20,637	0,752
7-Mai	19,69	2,28	0,377	73,740	3,746	0,217	10,025	20,690	0,750
8-Mai	19,56	2,02	0,892	92,568	4,733	0,749	10,314	20,464	0,851
9-Mai	19,66	2,12	0,980	85,164	4,333	0,993	10,011	20,611	0,614
10-Mai	19,58	2,18	0,936	79,478	4,058	0,891	9,912	20,559	0,823
11-Mai	19,47	2,26	0,977	73,435	3,773	0,970	9,441	20,462	0,453
12-Mai	19,65	2,15	0,976	82,739	4,210	0,949	10,528	20,594	0,851
13-Mai	19,44	2,31	0,725	65,512	3,370	0,438	10,118	20,426	0,896
14-Mai	19,43	2,60	0,094	48,085	2,475	0,036 *	9,866	20,472	0,614
15-Mai	19,44	2,54	0,314	53,711	2,762	0,167	9,442	20,504	0,933
16-Mai	19,15	2,54	0,368	54,181	2,829	0,306	8,761	20,242	0,768
17-Mai	19,21	2,84	0,846	40,632	2,115	0,490	8,269	20,378	0,965
18-Mai	19,25	2,63	0,378	49,725	2,584	0,170	8,750	20,358	0,909
19-Mai	19,02	2,56	0,836	51,321	2,699	0,592	8,932	20,099	0,994
20-Mai	19,12	2,56	0,506	55,073	2,881	0,369	8,455	20,099	0,589
21-Mai	19,07	2,66	0,773	48,069	2,521	0,568	8,713	20,191	0,944
22-Mai	18,80	2,58	0,986	52,589	2,797	0,821	7,817	19,921	0,975
23-Mai	18,64	2,36	0,448	58,953	3,163	0,249	9,388	19,650	0,920
24-Mai	18,41	2,39	0,933	56,748	3,082	0,883	9,032	19,445	0,969
25-Mai	18,47	2,70	0,967	44,777	2,424	0,773	7,405	19,627	0,862
26-Mai	18,00	2,41	0,762	52,726	2,930	0,464	8,690	19,030	0,847
27-Mai	18,10	2,25	0,639	61,720	3,409	0,473	9,604	19,075	0,813
28-Mai	18,28	2,43	0,871	56,049	3,066	0,761	8,559	19,335	0,795
29-Mai	18,20	2,42	0,983	50,925	2,799	0,838	8,878	19,218	0,634
30-Mai	18,14	2,91	0,815	38,384	2,117	0,709	6,168	19,366	0,395
31-Mai	17,66	2,86	0,878	33,035	1,871	0,505	7,588	18,816	0,847

*Rejeita-se H_0 a um nível de significância de 0,05.

Tabela 6 - Valores das estimativas dos parâmetros média (μ) e desvio padrão (σ) para a distribuição normal, forma (α) e taxa (λ) para a distribuição gama e forma (α) e escala (β) para a distribuição Weibull, com seus respectivos “valor p” do teste de aderência (Kolmogorov-Smirnov). Valores referentes à análise estatística para a série histórica diária de temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$) em Piracicaba (SP). Série histórica: 94 anos, mês: 94 anos, mês: Junho

Dia	Normal			Gama			Weibull		
	μ	σ	valor p	$\alpha(\text{forma})$	$\lambda(\text{taxa})$	valor p	$\alpha(\text{forma})$	$\beta(\text{escala})$	valor p
1-Jun	17,57	2,87	0,427	31,181	1,775	0,161	7,853	18,707	0,657
2-Jun	17,63	2,72	0,750	37,407	2,122	0,372	7,797	18,755	0,983
3-Jun	17,76	2,54	0,484	46,217	2,602	0,390	7,932	18,843	0,834
4-Jun	17,64	2,46	0,703	50,804	2,881	0,485	8,196	18,703	0,409
5-Jun	17,65	2,55	0,869	44,941	2,546	0,697	8,041	18,738	0,490
6-Jun	17,84	2,63	0,929	45,478	2,550	0,931	7,511	18,972	0,809
7-Jun	17,62	2,66	0,980	42,350	2,403	0,879	7,440	18,758	0,837
8-Jun	17,72	2,72	0,571	38,590	2,178	0,341	7,964	18,846	0,983
9-Jun	17,62	2,82	0,242	35,030	1,988	0,129	7,853	18,770	0,725
10-Jun	17,91	2,83	0,634	34,241	1,912	0,454	7,847	19,047	0,653
11-Jun	17,91	2,53	0,582	48,039	2,683	0,561	8,306	18,993	0,682
12-Jun	17,96	2,24	0,520	59,273	3,300	0,372	9,840	18,907	0,669
13-Jun	17,76	2,53	0,678	45,454	2,559	0,433	8,540	18,821	0,990
14-Jun	18,10	2,48	0,517	48,046	2,654	0,313	9,094	19,130	0,935
15-Jun	17,79	2,45	0,706	48,668	2,735	0,557	8,679	18,826	0,790
16-Jun	17,64	2,56	0,811	45,636	2,587	0,621	7,896	18,743	0,821
17-Jun	17,60	2,43	0,232	48,950	2,781	0,118	9,014	18,624	0,591
18-Jun	17,66	2,45	0,350	47,664	2,699	0,350	8,703	18,687	0,857
19-Jun	17,64	2,69	0,123	36,506	2,070	0,033 *	8,311	18,712	0,606
20-Jun	17,51	2,90	0,106	30,246	1,727	0,025 *	7,953	18,647	0,615
21-Jun	17,77	2,47	0,259	46,186	2,599	0,097	9,022	18,782	0,895
22-Jun	17,66	2,23	0,737	57,566	3,260	0,215	9,594	18,600	0,947
23-Jun	17,81	2,10	0,339	67,915	3,812	0,186	10,060	18,717	0,808
24-Jun	17,72	2,30	0,260	50,316	2,840	0,143	9,890	18,645	0,701
25-Jun	17,79	2,46	0,232	43,482	2,444	0,069	9,069	18,772	0,779
26-Jun	17,68	2,53	0,129	41,168	2,329	0,030 *	8,730	18,683	0,502
27-Jun	17,81	2,41	0,497	48,727	2,737	0,249	8,945	18,802	0,878
28-Jun	17,53	2,33	0,357	53,371	3,045	0,172	8,435	18,525	0,649
29-Jun	17,66	2,20	0,791	60,022	3,400	0,499	9,331	18,596	0,947
30-Jun	17,82	2,17	0,394	63,586	3,569	0,223	9,120	18,747	0,653

*Rejeita-se H_0 a um nível de significância de 0,05.

Tabela 7 - Valores das estimativas dos parâmetros média (μ) e desvio padrão (σ) para a distribuição normal, forma (α) e taxa (λ) para a distribuição gama e forma (α) e escala (β) para a distribuição Weibull, com seus respectivos “valor p” do teste de aderência (Kolmogorov-Smirnov). Valores referentes à análise estatística para a série histórica diária de temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$) em Piracicaba (SP). Série histórica: 94 anos, mês: 94 anos, mês: Julho

Dia	Normal			Gama			Weibull		
	μ	σ	valor p	$\alpha(\text{forma})$	$\lambda(\text{taxa})$	valor p	$\alpha(\text{forma})$	$\beta(\text{escala})$	valor p
1-Jul	18,08	2,08	0,903	71,529	3,956	0,790	10,074	18,986	0,643
2-Jul	17,93	2,25	0,886	59,989	3,345	0,788	9,332	18,897	0,815
3-Jul	18,02	2,47	0,493	45,768	2,540	0,189	8,957	19,024	0,908
4-Jul	17,90	2,23	0,202	58,468	3,267	0,112	9,951	18,827	0,776
5-Jul	17,47	2,54	0,269	38,185	2,186	0,082	8,815	18,465	0,882
6-Jul	17,38	2,66	0,129	38,656	2,225	0,048 *	7,855	18,473	0,536
7-Jul	17,22	2,92	0,487	30,642	1,779	0,198	7,121	18,406	0,971
8-Jul	17,43	2,59	0,481	41,164	2,362	0,374	8,327	18,508	0,771
9-Jul	17,12	2,97	0,645	30,254	1,767	0,314	6,999	18,337	0,995
10-Jul	16,55	2,94	0,741	28,642	1,731	0,561	6,541	17,745	0,975
11-Jul	16,46	2,96	0,509	27,517	1,671	0,185	6,614	17,663	0,955
12-Jul	16,55	3,02	0,567	26,628	1,609	0,259	6,495	17,771	0,972
13-Jul	16,96	2,77	0,951	34,354	2,025	0,778	7,034	18,114	0,887
14-Jul	17,24	2,54	0,988	43,831	2,543	0,848	7,595	18,322	0,964
15-Jul	17,54	2,48	0,994	49,498	2,822	0,892	7,881	18,616	0,869
16-Jul	17,45	2,69	0,795	41,731	2,392	0,862	7,227	18,605	0,767
17-Jul	17,19	2,70	0,958	36,846	2,144	0,643	7,546	18,308	0,846
18-Jul	17,51	2,96	0,364	28,042	1,602	0,092	7,660	18,659	0,469
19-Jul	17,32	2,69	0,515	37,745	2,179	0,229	7,612	18,432	0,975
20-Jul	17,36	2,75	0,426	36,002	2,074	0,242	7,692	18,490	0,837
21-Jul	17,53	3,05	0,782	28,305	1,615	0,331	6,781	18,753	0,857
22-Jul	17,78	3,06	0,742	30,616	1,722	0,368	7,008	19,033	0,994
23-Jul	17,57	2,56	0,582	45,396	2,584	0,413	7,958	18,668	0,737
24-Jul	17,37	2,41	0,749	49,351	2,841	0,544	8,161	18,402	0,953
25-Jul	17,74	2,52	0,683	46,745	2,635	0,501	8,555	18,804	0,753
26-Jul	17,67	2,63	0,409	42,665	2,414	0,208	7,895	18,791	0,735
27-Jul	17,89	2,54	0,362	46,224	2,583	0,195	8,671	18,958	0,890
28-Jul	18,08	2,62	0,938	43,207	2,390	0,662	8,156	19,172	0,972
29-Jul	18,13	2,56	0,910	46,339	2,557	0,669	8,515	19,204	0,988
30-Jul	18,01	2,91	0,403	34,473	1,914	0,174	7,731	19,202	0,952
31-Jul	18,11	2,81	0,083	36,342	2,007	0,033 *	8,574	19,235	0,472

*Rejeita-se H_0 a um nível de significância de 0,05.

Tabela 8 - Valores das estimativas dos parâmetros média (μ) e desvio padrão (σ) para a distribuição normal, forma (α) e taxa (λ) para a distribuição gama e forma (α) e escala (β) para a distribuição Weibull, com seus respectivos “valor p” do teste de aderência (Kolmogorov-Smirnov). Valores referentes à análise estatística para a série histórica diária de temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$) em Piracicaba (SP). Série histórica: 94 anos, mês: Agosto

Dia	Normal			Gama			Weibull		
	μ	σ	valor p	$\alpha(\text{forma})$	$\lambda(\text{taxa})$	valor p	$\alpha(\text{forma})$	$\beta(\text{escala})$	valor p
1-Ago	18,29	2,78	0,117	37,466	2,049	0,046 *	8,293	19,406	0,538
2-Ago	18,39	2,53	0,896	48,084	2,615	0,571	8,350	19,451	0,923
3-Ago	18,38	2,41	0,301	54,492	2,964	0,155	8,946	19,413	0,891
4-Ago	18,41	2,44	0,526	52,809	2,868	0,317	9,291	19,440	0,977
5-Ago	18,48	2,69	0,835	44,023	2,382	0,582	8,030	19,617	1,000
6-Ago	18,65	2,93	0,570	36,712	1,969	0,250	7,561	19,860	0,964
7-Ago	18,71	2,86	0,378	37,919	2,027	0,185	7,842	19,885	0,865
8-Ago	18,83	2,63	0,428	45,964	2,441	0,197	8,663	19,924	0,833
9-Ago	19,01	2,61	0,092	46,023	2,421	0,024 *	8,968	20,071	0,321
10-Ago	18,83	2,47	0,855	54,465	2,892	0,569	8,753	19,890	0,950
11-Ago	18,77	2,27	0,573	67,545	3,598	0,353	9,142	19,763	0,930
12-Ago	19,08	2,56	0,495	53,272	2,792	0,260	8,697	20,181	0,240
13-Ago	19,29	2,84	0,399	43,633	2,262	0,254	8,038	20,496	0,836
14-Ago	19,38	2,70	0,979	49,047	2,531	0,775	8,100	20,539	0,822
15-Ago	18,70	3,31	0,491	26,832	1,435	0,158	6,964	20,014	0,918
16-Ago	18,82	3,04	0,376	32,913	1,749	0,135	7,743	20,037	0,953
17-Ago	19,21	2,83	0,278	41,612	2,166	0,102	8,368	20,381	0,872
18-Ago	19,22	2,54	0,600	54,084	2,814	0,349	8,921	20,313	0,984
19-Ago	19,26	2,63	0,614	51,306	2,664	0,430	8,226	20,385	0,776
20-Ago	19,17	2,44	0,639	57,681	3,010	0,495	9,562	20,209	0,723
21-Ago	19,34	2,59	0,337	49,833	2,577	0,159	9,080	20,415	0,939
22-Ago	19,11	2,79	0,527	43,963	2,301	0,273	7,655	20,283	0,919
23-Ago	19,28	2,76	0,421	46,418	2,407	0,208	7,690	20,459	0,289
24-Ago	19,75	2,57	0,971	56,215	2,847	0,786	8,521	20,859	0,937
25-Ago	19,98	2,58	0,415	54,841	2,745	0,254	9,501	21,064	0,882
26-Ago	19,94	2,70	0,304	51,081	2,562	0,164	8,976	21,081	0,742
27-Ago	19,95	2,72	0,044 *	47,383	2,375	0,031 *	9,398	21,055	0,039 *
28-Ago	20,01	2,73	0,584	50,244	2,511	0,421	8,886	21,171	0,774
29-Ago	19,94	2,67	0,952	53,509	2,684	0,823	8,477	21,095	0,968
30-Ago	19,75	2,91	0,495	43,627	2,209	0,304	7,927	20,984	0,715
31-Ago	20,09	3,02	0,466	41,100	2,046	0,325	8,101	21,353	0,680

*Rejeita-se H_0 a um nível de significância de 0,05.

Tabela 9 - Valores das estimativas dos parâmetros média (μ) e desvio padrão (σ) para a distribuição normal, forma (α) e taxa (λ) para a distribuição gama e forma (α) e escala (β) para a distribuição Weibull, com seus respectivos “valor p” do teste de aderência (Kolmogorov-Smirnov). Valores referentes à análise estatística para a série histórica diária de temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$) em Piracicaba (SP). Série histórica: 94 anos, mês: 94 anos, mês: Setembro

Dia	Normal			Gama			Weibull		
	μ	σ	valor p	$\alpha(\text{forma})$	$\lambda(\text{taxa})$	valor p	$\alpha(\text{forma})$	$\beta(\text{escala})$	valor p
1-Set	20,66	2,68	0,848	56,605	2,740	0,681	8,586	21,820	0,850
2-Set	20,13	2,87	0,903	45,742	2,273	0,840	8,390	21,339	0,923
3-Set	20,04	2,95	0,354	43,238	2,158	0,275	8,215	21,281	0,725
4-Set	20,05	2,88	0,972	46,790	2,334	0,858	8,026	21,287	0,944
5-Set	19,96	3,14	0,272	37,275	1,868	0,174	7,657	21,268	0,670
6-Set	20,04	2,90	0,920	43,591	2,175	0,656	8,384	21,250	0,992
7-Set	20,35	2,66	0,998	57,934	2,847	0,995	8,473	21,515	0,619
8-Set	20,73	2,55	0,868	65,525	3,160	0,918	8,583	21,870	0,743
9-Set	20,45	2,56	0,558	60,211	2,945	0,322	9,260	21,550	0,864
10-Set	20,94	2,88	0,242	50,569	2,415	0,140	8,611	22,175	0,771
11-Set	21,06	2,71	0,469	59,853	2,842	0,302	9,239	22,236	0,769
12-Set	20,99	2,86	0,246	51,069	2,433	0,179	8,786	22,206	0,640
13-Set	21,15	2,60	0,573	62,994	2,978	0,469	9,533	22,284	0,675
14-Set	21,41	2,78	0,740	51,682	2,414	0,409	9,660	22,546	0,996
15-Set	20,99	3,02	0,633	42,036	2,003	0,369	8,458	22,230	0,999
16-Set	20,26	2,89	0,546	45,609	2,251	0,413	8,645	21,474	0,616
17-Set	20,33	2,78	0,900	52,898	2,602	0,635	8,293	21,534	0,937
18-Set	20,76	3,06	0,783	45,560	2,195	0,707	7,668	22,081	0,501
19-Set	21,13	2,32	0,808	81,859	3,873	0,582	10,097	22,166	0,902
20-Set	21,23	2,96	0,378	48,079	2,265	0,171	8,383	22,485	0,882
21-Set	21,04	2,78	0,794	54,858	2,607	0,628	8,619	22,243	0,965
22-Set	20,95	2,89	0,904	48,678	2,324	0,627	8,517	22,167	0,809
23-Set	21,35	3,06	0,555	44,805	2,099	0,265	8,261	22,635	0,981
24-Set	21,31	3,04	0,310	46,658	2,189	0,137	8,034	22,613	0,818
25-Set	21,20	2,76	0,876	58,159	2,743	0,929	8,270	22,424	0,873
26-Set	20,92	2,80	0,853	55,355	2,645	0,952	7,942	22,142	0,623
27-Set	21,29	2,74	0,926	59,827	2,810	0,993	8,057	22,511	0,362
28-Set	21,63	2,68	0,991	64,501	2,982	0,919	8,982	22,807	0,734
29-Set	21,73	2,45	0,937	77,905	3,586	0,985	9,710	22,818	0,615
30-Set	21,50	2,83	0,353	57,089	2,655	0,243	8,722	22,736	0,502

*Rejeita-se H_0 a um nível de significância de 0,05.

Tabela 10 - Valores das estimativas dos parâmetros média (μ) e desvio padrão (σ) para a distribuição normal, forma (α) e taxa (λ) para a distribuição gama e forma (α) e escala (β) para a distribuição Weibull, com seus respectivos “valor p” do teste de aderência (Kolmogorov-Smirnov). Valores referentes à análise estatística para a série histórica diária de temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$) em Piracicaba (SP). Série histórica: 94 anos, mês: 94 anos, mês: Outubro

Dia	Normal			Gama			Weibull		
	μ	σ	valor p	$\alpha(\text{forma})$	$\lambda(\text{taxa})$	valor p	$\alpha(\text{forma})$	$\beta(\text{escala})$	valor p
1-Out	21,82	2,68	0,625	62,564	2,867	0,363	9,177	22,981	0,789
2-Out	22,14	2,40	0,819	83,914	3,790	0,770	9,701	23,234	0,463
3-Out	22,11	2,61	0,837	71,004	3,211	0,704	9,278	23,274	0,956
4-Out	22,31	2,68	0,344	68,601	3,075	0,266	9,607	23,484	0,749
5-Out	22,72	2,51	0,622	80,954	3,563	0,401	10,224	23,835	0,899
6-Out	22,47	2,81	0,860	63,407	2,821	0,612	8,845	23,709	0,967
7-Out	22,40	2,68	0,813	69,067	3,083	0,564	9,307	23,584	0,805
8-Out	22,21	2,44	0,934	81,876	3,687	0,981	9,406	23,323	0,317
9-Out	22,37	2,65	0,947	70,591	3,156	0,909	9,272	23,543	0,770
10-Out	22,10	2,90	0,926	55,308	2,502	0,936	8,511	23,361	0,543
11-Out	21,76	3,00	0,721	52,111	2,395	0,540	8,068	23,064	0,662
12-Out	21,68	3,06	0,686	49,650	2,291	0,690	7,625	23,003	0,278
13-Out	22,03	2,95	0,975	55,255	2,508	0,846	8,281	23,321	0,880
14-Out	22,48	2,68	0,819	69,475	3,091	0,903	8,895	23,682	0,654
15-Out	22,53	2,56	0,656	76,661	3,402	0,801	9,826	23,669	0,500
16-Out	22,69	2,56	0,839	77,973	3,436	0,903	9,679	23,842	0,521
17-Out	22,60	2,50	0,837	80,858	3,579	0,965	9,767	23,727	0,572
18-Out	22,60	2,49	0,990	81,122	3,590	0,894	10,340	23,702	0,739
19-Out	22,19	2,50	0,593	78,109	3,521	0,814	9,279	23,325	0,317
20-Out	21,74	2,90	0,576	55,660	2,560	0,841	7,982	23,019	0,306
21-Out	22,39	2,86	0,988	60,788	2,715	1,000	8,316	23,652	0,526
22-Out	22,38	2,25	0,940	97,604	4,360	0,864	10,472	23,410	0,831
23-Out	22,35	2,22	0,738	100,340	4,489	0,873	10,639	23,348	0,724
24-Out	22,53	2,63	0,393	72,695	3,226	0,244	9,916	23,678	0,215
25-Out	22,77	2,60	0,872	75,708	3,325	0,649	9,868	23,916	0,977
26-Out	23,06	2,39	0,689	92,132	3,995	0,837	10,434	24,148	0,563
27-Out	23,08	2,47	0,965	86,472	3,747	0,951	10,603	24,173	0,830
28-Out	22,88	2,31	0,736	97,249	4,250	0,542	11,158	23,911	0,346
29-Out	22,55	2,78	0,540	64,828	2,875	0,332	9,052	23,762	0,825
30-Out	22,55	2,49	0,640	81,297	3,605	0,416	10,363	23,652	0,988
31-Out	22,78	2,72	0,963	69,194	3,038	0,784	9,639	23,967	0,799

*Rejeita-se H_0 a um nível de significância de 0,05.

Tabela 11 - Valores das estimativas dos parâmetros média (μ) e desvio padrão (σ) para a distribuição normal, forma (α) e taxa (λ) para a distribuição gama e forma (α) e escala (β) para a distribuição Weibull, com seus respectivos “valor p” do teste de aderência (Kolmogorov-Smirnov). Valores referentes à análise estatística para a série histórica diária de temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$) em Piracicaba (SP). Série histórica: 94 anos, mês: 94 anos, mês: Novembro

Dia	Normal			Gama			Weibull		
	μ	σ	valor p	$\alpha(\text{forma})$	$\lambda(\text{taxa})$	valor p	$\alpha(\text{forma})$	$\beta(\text{escala})$	valor p
1-Nov	22,87	2,60	0,961	76,449	3,342	0,988	9,546	24,042	0,780
2-Nov	22,78	2,43	0,827	86,711	3,807	0,699	10,606	23,864	0,781
3-Nov	22,91	2,58	0,891	74,013	3,230	0,652	10,766	24,018	0,893
4-Nov	22,99	2,70	0,380	71,931	3,129	0,220	9,920	24,158	0,891
5-Nov	23,25	2,34	1,000	97,733	4,204	0,986	11,010	24,295	0,893
6-Nov	23,19	2,27	0,988	103,366	4,458	0,944	11,177	24,210	0,841
7-Nov	23,23	2,19	0,982	110,824	4,770	0,987	11,310	24,234	0,424
8-Nov	23,34	2,45	0,553	89,881	3,851	0,412	11,109	24,404	0,874
9-Nov	23,32	2,36	0,798	96,603	4,142	0,656	12,039	24,342	0,997
10-Nov	23,34	2,65	0,570	76,641	3,283	0,378	10,437	24,504	0,738
11-Nov	23,01	2,66	0,026 *	70,293	3,054	0,211	10,596	24,146	0,250
12-Nov	23,16	2,43	0,844	89,794	3,877	0,656	10,608	24,243	0,748
13-Nov	22,95	2,40	0,993	90,135	3,927	0,944	10,143	24,037	0,648
14-Nov	23,10	2,14	0,908	114,844	4,971	0,952	10,885	24,096	0,482
15-Nov	23,17	2,12	0,887	118,405	5,111	0,924	11,571	24,135	0,648
16-Nov	23,36	2,30	0,814	101,938	4,364	0,618	11,678	24,381	0,996
17-Nov	23,54	2,26	0,923	107,014	4,547	0,825	11,724	24,544	0,586
18-Nov	23,59	2,11	0,878	124,021	5,257	0,706	12,496	24,532	0,572
19-Nov	23,41	2,19	0,896	112,918	4,824	0,908	12,357	24,369	0,712
20-Nov	23,48	1,92	0,935	148,260	6,314	0,828	13,801	24,340	0,330
21-Nov	23,34	2,10	0,817	121,674	5,214	0,736	12,726	24,266	0,807
22-Nov	23,41	2,25	0,450	107,122	4,576	0,365	11,073	24,413	0,521
23-Nov	23,42	2,40	0,202	87,810	3,750	0,099	12,700	24,426	0,879
24-Nov	23,51	2,17	0,389	116,479	4,954	0,252	13,515	24,462	0,708
25-Nov	23,53	2,20	0,991	113,444	4,822	0,961	12,188	24,514	0,778
26-Nov	23,13	2,25	0,932	104,035	4,499	0,840	11,636	24,135	0,866
27-Nov	23,31	2,35	0,642	91,498	3,926	0,516	12,219	24,310	0,987
28-Nov	23,44	2,08	0,560	125,453	5,352	0,389	12,984	24,356	0,441
29-Nov	23,62	1,78	0,801	173,601	7,349	0,662	14,144	24,444	0,555
30-Nov	23,73	1,70	0,984	191,857	8,084	0,944	15,045	24,522	0,503

*Rejeita-se H_0 a um nível de significância de 0,05.

Tabela 12 - Valores das estimativas dos parâmetros média (μ) e desvio padrão (σ) para a distribuição normal, forma (α) e taxa (λ) para a distribuição gama e forma (α) e escala (β) para a distribuição Weibull, com seus respectivos “valor p” do teste de aderência (Kolmogorov-Smirnov). Valores referentes à análise estatística para a série histórica diária de temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$) em Piracicaba (SP). Série histórica: 94 anos, mês: 94 anos, mês: Dezembro

Dia	Normal			Gama			Weibull		
	μ	σ	valor p	$\alpha(\text{forma})$	$\lambda(\text{taxa})$	valor p	$\alpha(\text{forma})$	$\beta(\text{escala})$	valor p
1-Dez	23,88	2,03	0,968	136,848	5,731	0,956	12,703	24,813	0,412
2-Dez	23,94	2,28	0,134	109,117	4,558	0,075	12,999	24,919	0,761
3-Dez	23,89	2,50	0,573	90,193	3,776	0,473	11,736	24,971	0,774
4-Dez	23,92	2,26	0,948	110,379	4,614	0,803	11,614	24,944	0,549
5-Dez	23,93	2,19	0,408	118,612	4,956	0,266	11,919	24,923	0,326
6-Dez	24,18	2,10	0,421	131,129	5,423	0,279	14,129	25,088	0,997
7-Dez	23,94	1,98	0,860	144,381	6,031	0,705	13,771	24,819	0,955
8-Dez	23,98	1,97	0,887	146,108	6,092	0,738	13,400	24,871	0,641
9-Dez	23,97	1,99	0,401	143,189	5,973	0,270	13,405	24,868	0,514
10-Dez	24,07	1,88	0,583	162,893	6,769	0,427	15,233	24,881	0,783
11-Dez	24,09	2,05	0,311	136,931	5,684	0,206	14,085	24,982	0,894
12-Dez	24,15	2,01	0,620	143,466	5,940	0,453	14,317	25,041	0,990
13-Dez	24,19	1,87	0,390	165,529	6,842	0,272	14,658	25,036	0,885
14-Dez	24,03	2,18	0,630	120,062	4,996	0,442	12,569	24,991	0,640
15-Dez	23,89	1,97	0,883	146,155	6,118	0,762	13,412	24,791	0,821
16-Dez	24,06	1,92	0,600	154,779	6,432	0,437	14,838	24,916	0,997
17-Dez	23,81	1,95	0,363	147,325	6,187	0,244	15,205	24,649	0,713
18-Dez	23,61	1,92	0,327	149,568	6,335	0,256	14,863	24,444	0,698
19-Dez	23,77	1,97	0,627	143,937	6,056	0,513	14,919	24,616	0,843
20-Dez	23,99	1,87	0,710	162,102	6,758	0,546	15,979	24,792	0,989
21-Dez	24,08	1,96	0,134	149,288	6,201	0,088	16,031	24,918	0,712
22-Dez	24,11	1,88	0,337	162,065	6,721	0,234	16,263	24,921	0,922
23-Dez	23,98	1,91	0,547	155,625	6,489	0,399	15,087	24,821	0,923
24-Dez	23,88	2,12	0,771	125,068	5,238	0,581	13,385	24,816	0,994
25-Dez	23,72	1,92	0,569	151,505	6,388	0,435	14,422	24,581	0,950
26-Dez	23,71	1,74	0,635	184,177	7,768	0,562	15,053	24,513	0,242
27-Dez	23,97	1,74	0,921	187,016	7,801	0,819	15,581	24,768	0,964
28-Dez	24,13	1,60	0,985	224,213	9,293	0,950	16,669	24,864	0,631
29-Dez	23,93	1,80	0,629	174,328	7,284	0,481	15,105	24,743	0,480
30-Dez	23,92	1,71	0,868	192,873	8,062	0,737	15,994	24,693	0,998
31-Dez	24,18	1,85	0,982	168,798	6,981	0,912	14,625	25,022	0,918

*Rejeita-se H_0 a um nível de significância de 0,05.

Quanto à radiação solar global, Martin (2007) observou que a distribuição de probabilidade que melhor se ajustou aos dados diários, a um nível de significância de 5%, foi a distribuição normal (88,18%), seguida pela log-normal (88,05%), gama (87,60), Weibull (85,19%) e exponencial (33,99%). O autor observou um decréscimo de aderências às distribuições em períodos mais secos. Resultados obtidos por Assis et al. (2004) para esta variável em Piracicaba, SP, também indicam que os dados podem ser avaliados segundo a distribuição normal.

Cargnelutti Filho et al. (2004), em análise de 22 séries de dados dos municípios do Rio Grande do Sul, verificaram que as funções de distribuição de probabilidade normal, log-normal, gama, gumbel e Weibull foram bem ajustadas aos dados de radiação solar global (médias decendiais), sendo o melhor ajuste reportado para a distribuição de probabilidade normal e o pior ajuste foi atribuído à distribuição Weibull.

Estefanel et al. (1997), com o objetivo de determinar a probabilidade de ocorrência de dias com valores de radiação solar global inferiores aqueles considerados críticos ao desenvolvimento do tomateiro, para a região de Santa Maria, RS, verificaram o ajustamento do número de dias com radiação solar baixa em cada mês às distribuições binomial negativa e Poisson, utilizando o teste de Kolmogorov-Smirnov. Em estudo similar, Buriol et al. (2001), pesquisando as probabilidades de ocorrência de valores de radiação solar prejudiciais ao cultivo de pepino na região do baixo Vale do Taquari, RS, ajustaram os dados diários de radiação solar por decêndio de cada mês e avaliaram este ajuste às distribuições normal, binomial negativa e Poisson, utilizando-se o teste de Kolmogorov-Smirnov, e concluíram pela utilização da distribuição de Poisson.

Os resultados dos ajustes das distribuições normal, gama e Weibull aos dados de radiação solar global para cada dia do ano são apresentados nas Tabelas 13 a 24. Observa-se que, para esta variável, a distribuição normal obteve ajuste em 99,73% dos casos, sendo que os valores p foram relativamente superiores às demais distribuições. Esta distribuição não aderiu aos dados em apenas um dia do ano (14/6). A distribuição gama teve aderência satisfatória em 338 dias do ano (92,60%), com decréscimo em períodos mais secos - informação que corrobora os dados reportados por Martin (2007), acima citados. Já a distribuição Weibull aderiu aos dados somente em 252 dias, ou 69,04% dos casos, sendo que os meses com menores aderências foram setembro, outubro e novembro.

O processo de estimação dos parâmetros de algumas funções de distribuição, em alguns casos, não pode ser resolvido de maneira analítica devido à forma não linear

apresentada por suas funções, o que leva a utilização de recursos numéricos computacionais para que se consiga estimar os parâmetros relacionados ao modelo escolhido. Um desses recursos é a otimização não linear, a qual, mediante alguns métodos, proporciona a estimação desejada e que seria de difícil obtenção, de forma analítica.

À título de demonstração dos valores dos parâmetros α e β da distribuição Weibull, dos 113 dias onde não houve ajuste, 110 não apresentaram convergência dos dados para o cálculo dos parâmetros pelo método da máxima verossimilhança (padrão), ou seja, o estimador de máxima verossimilhança não conseguiu escolher aquele par de parâmetros que melhor explica a amostra observada. Foi, então, usada uma função de otimização com base em Byrd et al. (1995), pelo do método "*L-BFGS-B*", disponível no *software* R, e que permite que cada variável seja calculada com base em um limite inferior e/ou superior. Os valores dos dias 10/10, 9/12 e 19/12 também não apresentaram convergência de dados por este método.

Quanto à análise dos parâmetros, têm-se as menores médias diárias de radiação solar nos meses de maio a julho e as maiores nos meses de outubro a março. O desvio padrão oscilou entre 39,49 e 183,54, com média de 118,80.

Os parâmetros da distribuição gama apresentaram valores mínimo, máximo e médio de 3,58, 60,88 e 9,94, respectivamente, para forma (α), e de 0,009, 0,194 e 0,026, respectivamente, para taxa (λ). Para a distribuição Weibull, têm-se para o parâmetro forma (α), 2,24, 9,19 e 3,97, respectivamente, valores mínimo, máximo e médio, e para a escala (β), 284,92, 587,06 e 437,91.

Para a variável radiação solar global, as distribuições que obtiveram melhor desempenho quanto aos ajustes aos dados diários das séries históricas foram a normal e a gama.

Destaca-se que, tanto para a radiação solar global quanto para a temperatura média do ar, a distribuição normal foi a mais homogênea dentre as três analisadas (ajuste superior a 99,4% em ambos os casos). Tal informação é valiosa no que diz respeito às inferências estatísticas nesta localidade, propiciando adequada previsibilidade do clima.

Tabela 13 - Valores das estimativas dos parâmetros média (μ) e desvio padrão (σ) para a distribuição normal, forma (α) e taxa (λ) para a distribuição gama e forma (α) e escala (β) para a distribuição Weibull, com seus respectivos “valor p” do teste de aderência (Kolmogorov-Smirnov). Valores referentes à análise estatística para a série histórica diária de radiação solar global ($\text{cal cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$) em Piracicaba (SP).
Série histórica: 31 anos, mês: Janeiro

Dia	Normal			Gama			Weibull		
	μ	σ	valor p	$\alpha(\text{forma})$	$\lambda(\text{taxa})$	valor p	$\alpha(\text{forma})$	$\beta(\text{escala})$	valor p
1-Jan	457,23	136,53	0,563	10,260	0,022	0,380	3,796	507,943	0,677
2-Jan	403,87	154,04	0,698	5,471	0,014	0,470	2,952	453,423	0,655
3-Jan	405,16	153,22	0,541	6,735	0,017	0,597	2,895	455,633	0,617 ⁱ
4-Jan	410,00	152,72	0,813	6,300	0,015	0,418	3,006	461,636	0,802
5-Jan	422,45	140,87	0,727	8,080	0,019	0,747	3,412	472,780	0,712
6-Jan	438,71	148,42	0,880	5,546	0,013	0,232	3,317	486,299	0,797 ⁱ
7-Jan	468,55	144,36	0,959	8,875	0,019	0,721	3,734	519,911	0,977 ⁱ
8-Jan	413,35	156,07	0,741	5,845	0,014	0,677	2,931	463,923	0,745 ⁱ
9-Jan	430,90	142,63	0,783	8,158	0,019	0,613	3,464	481,977	0,775
10-Jan	473,94	134,35	0,893	10,337	0,022	0,622	4,096	523,709	0,965
11-Jan	441,39	160,65	0,667	5,686	0,013	0,356	3,116	493,876	0,626
12-Jan	418,10	132,03	0,998	9,227	0,022	0,802	3,421	465,530	0,997
13-Jan	434,81	150,87	0,378	7,238	0,017	0,170	3,237	486,321	0,387
14-Jan	468,47	127,93	0,995	12,037	0,026	0,921	3,966	516,001	0,972 ⁱ
15-Jan	442,94	112,92	0,715	14,467	0,033	0,907	4,236	486,254	0,576
16-Jan	464,48	129,25	0,776	12,498	0,027	0,959	3,954	513,261	0,803
17-Jan	443,87	138,30	0,860	9,417	0,021	0,717	3,589	494,494	0,929
18-Jan	458,06	140,66	0,840	9,410	0,021	0,436	3,614	508,421	0,857 ⁱ
19-Jan	455,90	114,24	0,796	14,518	0,032	0,722	4,312	500,237	0,624
20-Jan	429,47	118,94	0,291	11,029	0,026	0,199	4,297	474,083	0,374
21-Jan	446,32	135,72	0,372	8,616	0,019	0,268	3,794	494,277	0,409 ⁱ
22-Jan	435,71	146,61	0,995	7,120	0,016	0,646	3,405	485,785	0,995 ⁱ
23-Jan	454,74	119,22	0,978	14,467	0,032	0,997	4,101	499,908	0,930
24-Jan	469,65	126,92	0,974	12,714	0,027	0,876	4,215	518,449	0,973
25-Jan	416,84	132,97	0,447	9,391	0,023	0,665	3,509	464,561	0,457
26-Jan	391,65	147,63	0,552	5,381	0,014	0,445	2,997	439,043	0,515
27-Jan	372,19	153,08	0,914	5,055	0,014	0,780	2,592	420,205	0,871
28-Jan	429,35	156,85	0,565	6,708	0,016	0,310	3,079	483,322	0,592
29-Jan	427,48	162,07	0,869	5,785	0,014	0,594	2,955	480,075	0,844 ⁱ
30-Jan	453,71	139,29	0,875	7,747	0,017	0,495	3,768	501,711	0,902 ⁱ
31-Jan	450,77	112,09	0,978	13,801	0,031	0,849	4,702	493,727	0,997

*Rejeita-se H_0 a um nível de significância de 0,05.

ⁱValores estimados por intermédio de otimização.

Tabela 14 - Valores das estimativas dos parâmetros média (μ) e desvio padrão (σ) para a distribuição normal, forma (α) e taxa (λ) para a distribuição gama e forma (α) e escala (β) para a distribuição Weibull, com seus respectivos “valor p” do teste de aderência (Kolmogorov-Smirnov). Valores referentes à análise estatística para a série histórica diária de radiação solar global ($\text{cal cm}^{-2} \text{d}^{-1}$) em Piracicaba (SP).
Série histórica: 31 anos, mês: Fevereiro

Dia	Normal			Gama			Weibull		
	μ	σ	valor p	$\alpha(\text{forma})$	$\lambda(\text{taxa})$	valor p	$\alpha(\text{forma})$	$\beta(\text{escala})$	valor p
1-Fev	447,10	155,02	0,965	7,289	0,016	0,871	3,240	500,058	0,963
2-Fev	444,71	117,15	0,988	13,455	0,030	0,898	4,168	489,830	0,987
3-Fev	425,42	144,18	0,854	7,298	0,017	0,435	3,342	475,785	0,876
4-Fev	443,90	135,66	0,990	8,993	0,020	0,697	3,608	491,881	0,989 ⁱ
5-Fev	460,58	147,59	0,927	7,406	0,016	0,442	3,605	511,202	0,943 ⁱ
6-Fev	463,87	141,07	0,979	8,874	0,019	0,889	3,713	513,937	0,990 ⁱ
7-Fev	450,71	125,26	0,974	10,300	0,023	0,814	4,103	496,263	0,969 ⁱ
8-Fev	434,00	138,52	0,928	8,373	0,019	0,719	3,590	482,857	0,923 ⁱ
9-Fev	425,94	146,22	0,997	7,421	0,017	0,948	3,229	477,053	0,994
10-Fev	416,80	134,99	0,495	7,784	0,019	0,193	3,564	463,653	0,535 ⁱ
11-Fev	445,37	137,84	0,572	9,589	0,022	0,540	3,661	496,041	0,566
12-Fev	469,93	138,72	0,998	9,658	0,021	0,794	3,873	519,906	0,999 ⁱ
13-Fev	457,37	141,73	0,726	6,968	0,015	0,235	3,603	504,958	0,675 ⁱ
14-Fev	435,61	132,40	0,602	9,088	0,021	0,502	3,814	482,966	0,646 ⁱ
15-Fev	465,13	116,87	0,720	13,810	0,030	0,624	4,636	510,314	0,600
16-Fev	463,42	122,77	0,326	14,077	0,030	0,545	3,949	510,180	0,232
17-Fev	456,48	129,16	0,892	11,606	0,025	0,671	3,878	505,137	0,777
18-Fev	438,00	131,86	0,620	8,715	0,020	0,347	3,974	485,409	0,725
19-Fev	486,45	136,01	0,967	9,561	0,020	0,560	4,107	534,933	0,985 ⁱ
20-Fev	443,84	159,39	0,977	6,027	0,014	0,547	3,125	496,982	0,970
21-Fev	485,16	122,92	0,775	14,631	0,030	0,853	4,533	533,357	0,766
22-Fev	462,03	133,21	0,705	10,803	0,023	0,368	3,839	510,792	0,679 ⁱ
23-Fev	466,53	132,01	0,393	9,121	0,020	0,142	4,263	514,030	0,528
24-Fev	441,00	115,13	0,974	13,546	0,031	0,890	4,276	485,479	0,971
25-Fev	430,23	131,92	0,961	9,802	0,023	0,715	3,640	478,767	0,984
26-Fev	448,94	102,36	0,843	18,244	0,041	0,881	5,049	490,058	0,830
27-Fev	435,45	100,74	0,904	16,086	0,037	0,743	4,704	474,541	0,821
28-Fev	429,61	150,68	0,856	6,456	0,015	0,654	3,264	481,242	0,859

*Rejeita-se H_0 a um nível de significância de 0,05.

ⁱValores estimados por intermédio de otimização.

Tabela 15 - Valores das estimativas dos parâmetros média (μ) e desvio padrão (σ) para a distribuição normal, forma (α) e taxa (λ) para a distribuição gama e forma (α) e escala (β) para a distribuição Weibull, com seus respectivos “valor p” do teste de aderência (Kolmogorov-Smirnov). Valores referentes à análise estatística para a série histórica diária de radiação solar global ($\text{cal cm}^{-2} \text{d}^{-1}$) em Piracicaba (SP).
Série histórica: 31 anos, mês: Março

Dia	Normal			Gama			Weibull		
	μ	σ	valor p	$\alpha(\text{forma})$	$\lambda(\text{taxa})$	valor p	$\alpha(\text{forma})$	$\beta(\text{escala})$	valor p
1-Mar	422,00	132,07	0,420	7,686	0,018	0,171	3,748	467,657	0,467 ⁱ
2-Mar	417,42	122,80	0,816	9,505	0,023	0,604	4,069	462,244	0,756
3-Mar	421,61	130,95	0,697	9,871	0,023	0,649	3,599	469,349	0,773
4-Mar	449,00	127,70	0,898	11,057	0,025	0,921	4,024	497,001	0,842
5-Mar	424,10	122,82	0,742	9,854	0,023	0,377	4,101	469,228	0,878
6-Mar	400,65	110,67	0,946	12,225	0,031	0,778	4,103	442,918	0,962
7-Mar	400,77	107,60	0,844	12,554	0,031	0,833	4,244	441,906	0,801
8-Mar	424,42	126,01	0,351	8,483	0,020	0,174	4,153	469,367	0,431
9-Mar	435,33	126,91	0,980	10,398	0,024	0,856	3,749	481,428	0,944 ⁱ
10-Mar	431,00	126,72	0,988	10,474	0,024	0,748	3,789	477,918	0,992
11-Mar	422,13	116,72	0,771	11,896	0,028	0,439	3,993	466,104	0,827
12-Mar	416,35	105,60	0,641	14,155	0,034	0,457	4,498	457,213	0,783
13-Mar	453,65	122,30	0,447	8,950	0,020	0,094	4,529	496,313	0,597
14-Mar	412,45	98,29	0,804	14,281	0,035	0,423	5,072	449,907	0,964
15-Mar	393,77	105,47	0,811	13,124	0,033	0,920	4,148	434,300	0,856
16-Mar	413,71	103,02	0,824	16,921	0,041	0,798	4,094	453,442	0,874
17-Mar	384,94	141,04	0,853	5,724	0,015	0,312	3,019	430,477	0,752 ⁱ
18-Mar	419,10	108,84	0,610	11,331	0,027	0,231	4,516	459,225	0,745
19-Mar	379,61	113,14	0,998	10,034	0,026	0,906	3,837	421,399	0,996
20-Mar	397,60	106,09	0,972	12,313	0,031	0,974	4,321	437,828	0,988
21-Mar	388,94	96,71	0,889	14,755	0,038	0,733	4,621	426,499	0,957
22-Mar	370,06	106,30	0,825	10,393	0,028	0,417	3,963	409,230	0,886
23-Mar	416,90	103,50	0,483	13,664	0,033	0,203	4,725	456,207	0,653
24-Mar	407,97	117,26	0,593	10,634	0,026	0,305	4,033	451,650	0,669
25-Mar	417,90	128,76	0,799	10,196	0,024	0,714	3,314	464,071	0,662
26-Mar	401,35	105,49	0,281	10,986	0,027	0,119	4,566	439,955	0,400
27-Mar	373,77	126,99	0,483	6,058	0,016	0,107	3,292	415,422	0,409 ⁱ
28-Mar	403,03	122,97	0,421	7,015	0,017	0,145	3,873	444,341	0,451 ⁱ
29-Mar	408,19	121,20	0,296	7,281	0,018	0,123	4,082	449,513	0,278
30-Mar	393,48	118,70	0,763	8,038	0,020	0,328	3,903	434,570	0,829 ⁱ
31-Mar	402,81	114,90	0,530	8,181	0,020	0,127	4,343	442,440	0,708

*Rejeita-se H_0 a um nível de significância de 0,05.

ⁱValores estimados por intermédio de otimização.

Tabela 16 - Valores das estimativas dos parâmetros média (μ) e desvio padrão (σ) para a distribuição normal, forma (α) e taxa (λ) para a distribuição gama e forma (α) e escala (β) para a distribuição Weibull, com seus respectivos “valor p” do teste de aderência (Kolmogorov-Smirnov). Valores referentes à análise estatística para a série histórica diária de radiação solar global ($\text{cal cm}^{-2} \text{d}^{-1}$) em Piracicaba (SP).
Série histórica: 31 anos, mês: Abril

Dia	Normal			Gama			Weibull		
	μ	σ	valor p	$\alpha(\text{forma})$	$\lambda(\text{taxa})$	valor p	$\alpha(\text{forma})$	$\beta(\text{escala})$	valor p
1-Abr	415,52	114,36	0,950	10,396	0,025	0,592	4,363	457,465	0,928
2-Abr	402,35	98,50	0,962	13,487	0,034	0,620	4,848	439,612	0,982
3-Abr	392,53	116,58	0,904	9,284	0,024	0,609	3,808	434,096	0,873 ⁱ
4-Abr	397,84	118,49	0,141	7,769	0,020	0,035 *	3,997	438,893	0,177
5-Abr	405,84	83,79	0,618	22,949	0,057	0,377	4,973	440,089	0,545
6-Abr	375,39	94,80	0,484	12,213	0,033	0,174	4,626	410,377	0,558
7-Abr	373,67	80,38	0,823	16,477	0,044	0,422	5,723	403,870	0,949
8-Abr	388,39	99,16	0,726	13,024	0,034	0,425	4,447	425,947	0,862
9-Abr	418,68	94,82	0,714	18,398	0,044	0,863	4,661	456,685	0,632
10-Abr	428,26	95,08	0,409	14,155	0,033	0,109	4,962	463,940	0,342
11-Abr	424,77	87,63	0,453	16,578	0,039	0,307	6,433	456,705	0,666
12-Abr	406,42	89,15	0,743	16,809	0,041	0,613	5,242	440,505	0,767
13-Abr	358,94	129,25	0,629	5,660	0,016	0,183	3,147	401,040	0,569
14-Abr	374,71	101,20	0,974	10,646	0,028	0,598	4,452	411,705	0,998
15-Abr	359,58	90,93	0,209	11,515	0,032	0,092	4,998	392,597	0,333
16-Abr	368,77	97,04	0,899	11,591	0,031	0,669	4,518	404,937	0,976
17-Abr	380,16	104,60	0,177	10,846	0,029	0,071	4,346	418,918	0,266
18-Abr	376,77	116,74	0,666	7,401	0,020	0,206	3,900	417,179	0,781
19-Abr	375,93	117,88	0,220	7,272	0,019	0,047 *	3,795	415,968	0,259 ⁱ
20-Abr	358,57	133,07	0,646	4,923	0,014	0,187	3,097	400,521	0,571 ⁱ
21-Abr	369,42	111,62	0,880	9,681	0,026	0,621	3,758	410,241	0,913
22-Abr	371,27	79,58	0,983	20,335	0,055	0,919	5,045	403,010	0,881
23-Abr	394,26	75,89	0,953	23,609	0,060	0,762	6,035	424,773	0,983
24-Abr	362,71	82,26	0,300	12,922	0,036	0,080	5,373	392,415	0,454
25-Abr	355,00	101,48	0,321	8,359	0,024	0,064	4,224	390,149	0,423
26-Abr	355,84	73,63	0,838	21,745	0,061	0,795	5,433	385,714	0,953
27-Abr	363,39	96,13	0,533	11,026	0,030	0,195	4,202	398,589	0,469
28-Abr	351,84	107,56	0,544	7,049	0,020	0,119	3,804	387,869	0,559 ⁱ
29-Abr	341,71	108,04	0,767	8,997	0,026	0,479	3,509	380,621	0,811
30-Abr	365,45	84,94	0,508	13,245	0,036	0,245	5,398	396,195	0,726

*Rejeita-se H_0 a um nível de significância de 0,05.

ⁱValores estimados por intermédio de otimização.

Tabela 17 - Valores das estimativas dos parâmetros média (μ) e desvio padrão (σ) para a distribuição normal, forma (α) e taxa (λ) para a distribuição gama e forma (α) e escala (β) para a distribuição Weibull, com seus respectivos “valor p” do teste de aderência (Kolmogorov-Smirnov). Valores referentes à análise estatística para a série histórica diária de radiação solar global ($\text{cal cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$) em Piracicaba (SP).
Série histórica: 31 anos, mês: Maio

Dia	Normal			Gama			Weibull		
	μ	σ	valor p	$\alpha(\text{forma})$	$\lambda(\text{taxa})$	valor p	$\alpha(\text{forma})$	$\beta(\text{escala})$	valor p
1-Mai	368,55	89,91	0,969	14,738	0,040	0,854	4,661	403,223	0,958
2-Mai	333,30	112,30	0,782	5,829	0,017	0,204	3,393	369,845	0,739 ⁱ
3-Mai	365,03	95,95	0,858	8,321	0,023	0,228	4,554	397,749	0,921
4-Mai	343,58	94,73	0,946	8,994	0,026	0,758	4,338	377,135	0,934
5-Mai	352,42	104,89	0,937	9,822	0,028	0,581	3,668	390,606	0,950
6-Mai	345,10	116,44	0,724	7,184	0,021	0,308	3,350	385,365	0,736
7-Mai	346,71	93,61	0,931	11,601	0,033	0,561	4,318	381,643	0,983
8-Mai	324,00	86,19	0,954	12,450	0,038	0,739	4,314	356,633	0,994
9-Mai	326,71	84,74	0,603	12,511	0,038	0,436	4,619	358,581	0,738
10-Mai	343,71	84,28	0,232	12,205	0,036	0,065	4,623	374,552	0,274
11-Mai	320,55	95,16	0,256	6,883	0,021	0,090	4,221	351,734	0,252
12-Mai	326,58	70,09	0,630	17,294	0,053	0,305	5,707	353,242	0,880
13-Mai	297,74	101,69	0,277	5,918	0,020	0,069	3,322	331,290	0,253
14-Mai	307,77	91,25	0,755	8,178	0,027	0,402	3,932	339,787	0,819
15-Mai	304,68	126,46	0,672	5,187	0,017	0,208	2,537	343,568	0,448
16-Mai	304,52	101,37	0,816	6,876	0,023	0,443	3,427	338,831	0,818 ⁱ
17-Mai	322,39	75,31	0,762	14,391	0,045	0,528	5,187	350,596	0,916
18-Mai	319,13	91,37	0,446	9,592	0,030	0,165	4,175	352,174	0,586
19-Mai	290,40	105,73	0,750	5,061	0,017	0,203	3,098	324,360	0,668
20-Mai	296,68	85,64	0,961	10,133	0,034	0,703	3,951	328,083	0,908
21-Mai	308,16	86,14	0,879	11,092	0,036	0,744	4,074	340,261	0,949
22-Mai	299,77	107,43	0,379	5,101	0,017	0,086	3,223	333,861	0,332 ⁱ
23-Mai	299,29	96,93	0,736	6,525	0,022	0,387	3,626	331,727	0,715 ⁱ
24-Mai	275,90	99,72	0,525	5,487	0,020	0,139	3,184	308,501	0,492
25-Mai	300,97	83,74	0,652	10,441	0,035	0,324	4,362	331,726	0,824
26-Mai	310,45	75,04	0,800	15,205	0,049	0,490	4,751	339,575	0,834
27-Mai	294,26	98,14	0,538	6,084	0,021	0,203	3,484	326,541	0,523 ⁱ
28-Mai	300,06	87,48	0,971	8,934	0,030	0,602	3,999	331,333	0,987
29-Mai	296,97	91,97	0,491	6,883	0,023	0,136	3,754	327,688	0,500 ⁱ
30-Mai	291,32	96,93	0,411	5,349	0,018	0,057	3,456	322,056	0,363 ⁱ
31-Mai	284,35	72,30	0,257	12,755	0,045	0,161	4,829	311,569	0,362

*Rejeita-se H_0 a um nível de significância de 0,05.

ⁱValores estimados por intermédio de otimização.

Tabela 18 - Valores das estimativas dos parâmetros média (μ) e desvio padrão (σ) para a distribuição normal, forma (α) e taxa (λ) para a distribuição gama e forma (α) e escala (β) para a distribuição Weibull, com seus respectivos “valor p” do teste de aderência (Kolmogorov-Smirnov). Valores referentes à análise estatística para a série histórica diária de radiação solar global ($\text{cal cm}^{-2} \text{d}^{-1}$) em Piracicaba (SP).
Série histórica: 31 anos, mês: Junho

Dia	Normal			Gama			Weibull		
	μ	σ	valor p	$\alpha(\text{forma})$	$\lambda(\text{taxa})$	valor p	$\alpha(\text{forma})$	$\beta(\text{escala})$	valor p
1-Jun	305,58	81,98	0,369	11,607	0,038	0,194	4,487	336,112	0,511
2-Jun	296,19	95,62	0,352	6,773	0,023	0,066	3,422	328,405	0,279
3-Jun	282,42	95,78	0,932	6,895	0,024	0,439	3,295	314,819	0,899
4-Jun	290,26	74,27	0,473	12,052	0,042	0,166	4,685	317,640	0,624
5-Jun	299,65	94,75	0,192	6,076	0,020	0,038 *	3,879	330,792	0,226
6-Jun	293,19	101,43	0,898	4,600	0,016	0,310	3,242	324,162	0,554 ⁱ
7-Jun	308,06	76,86	0,842	14,884	0,048	0,995	4,422	337,969	0,748
8-Jun	301,90	81,56	0,614	10,745	0,036	0,235	4,445	331,668	0,785
9-Jun	286,65	75,60	0,506	8,525	0,030	0,084	4,453	312,444	0,543
10-Jun	290,58	91,27	0,727	8,710	0,030	0,340	3,559	3,559	0,767
11-Jun	291,84	88,29	0,909	6,129	0,021	0,210	3,629	320,591	0,803 ⁱ
12-Jun	305,74	74,20	0,075	8,450	0,028	0,005 *	5,128	329,946	0,111
13-Jun	332,00	44,33	0,824	56,681	0,171	0,941	7,760	351,760	0,569
14-Jun	305,16	81,63	0,048*	8,407	0,028	0,004 *	4,822	332,346	0,098
15-Jun	307,19	73,34	0,364	11,907	0,039	0,143	5,408	333,158	0,581
16-Jun	288,39	83,48	0,602	9,268	0,032	0,236	3,994	318,293	0,688
17-Jun	301,00	73,44	1,000	15,011	0,050	0,947	4,634	329,572	0,994
18-Jun	301,45	97,43	0,228	5,350	0,018	0,032 *	3,562	332,212	0,195 ⁱ
19-Jun	303,45	78,07	0,818	11,499	0,038	0,387	4,489	332,072	0,839
20-Jun	279,32	102,06	0,497	4,711	0,017	0,078	3,078	311,189	0,393
21-Jun	296,26	88,75	0,796	7,674	0,026	0,377	3,843	326,934	0,831
22-Jun	289,58	88,61	0,468	6,797	0,023	0,135	3,758	319,148	0,464 ⁱ
23-Jun	290,97	79,74	0,190	8,134	0,028	0,029 *	4,622	317,850	0,299
24-Jun	286,03	71,62	0,508	11,486	0,040	0,179	4,908	311,705	0,703
25-Jun	256,81	80,44	0,073	7,771	0,030	0,032 *	3,934	284,918	0,087
26-Jun	299,23	77,69	0,515	10,583	0,035	0,155	4,573	327,041	0,639
27-Jun	311,81	68,77	0,258	15,994	0,051	0,082	5,319	337,807	0,356
28-Jun	281,45	84,91	0,138	6,485	0,023	0,030 *	4,214	308,902	0,145 ⁱ
29-Jun	293,00	73,81	0,995	14,026	0,048	0,891	4,384	321,277	0,995
30-Jun	305,87	68,22	0,666	18,146	0,059	0,529	5,028	332,713	0,482

*Rejeita-se H_0 a um nível de significância de 0,05.

ⁱValores estimados por intermédio de otimização.

Tabela 19 - Valores das estimativas dos parâmetros média (μ) e desvio padrão (σ) para a distribuição normal, forma (α) e taxa (λ) para a distribuição gama e forma (α) e escala (β) para a distribuição Weibull, com seus respectivos “valor p” do teste de aderência (Kolmogorov-Smirnov). Valores referentes à análise estatística para a série histórica diária de radiação solar global ($\text{cal cm}^{-2} \text{d}^{-1}$) em Piracicaba (SP).
Série histórica: 31 anos, mês: Julho

Dia	Normal			Gama			Weibull		
	μ	σ	valor p	$\alpha(\text{forma})$	$\lambda(\text{taxa})$	valor p	$\alpha(\text{forma})$	$\beta(\text{escala})$	valor p
1-Jul	313,23	39,49	0,713	60,881	0,194	0,589	9,186	330,240	0,741
2-Jul	287,71	85,12	0,177	7,551	0,026	0,024 *	3,974	316,777	0,204
3-Jul	306,26	57,11	0,457	30,870	0,101	0,684	5,222	330,445	0,285
4-Jul	313,03	69,87	0,861	19,592	0,063	0,684	4,697	341,142	0,646
5-Jul	313,03	69,29	0,789	16,178	0,052	0,399	5,229	339,431	0,849
6-Jul	298,42	84,30	0,847	9,239	0,031	0,416	3,964	328,562	0,876
7-Jul	301,03	88,05	0,874	8,013	0,027	0,337	3,957	331,625	0,906
8-Jul	308,35	98,72	0,473	6,214	0,020	0,096	3,635	340,655	0,462 ⁱ
9-Jul	313,58	94,65	0,479	7,255	0,023	0,089	3,894	345,857	0,524
10-Jul	281,93	110,08	0,342	4,532	0,016	0,065	2,873	316,420	0,263
11-Jul	309,90	94,72	0,173	6,654	0,021	0,036 *	3,891	341,428	0,191
12-Jul	307,87	89,16	0,640	9,133	0,030	0,253	4,090	339,743	0,761
13-Jul	316,48	88,56	0,107	8,101	0,026	0,022 *	4,451	346,673	0,158
14-Jul	322,06	85,88	0,257	7,636	0,024	0,048 *	4,607	350,079	0,293
15-Jul	324,65	77,56	0,535	14,710	0,045	0,254	4,822	354,209	0,594
16-Jul	313,52	93,10	0,739	7,789	0,025	0,211	3,914	345,761	0,768
17-Jul	308,10	93,26	0,737	7,969	0,026	0,302	3,901	340,763	0,810
18-Jul	296,32	87,40	0,457	7,520	0,025	0,122	4,269	326,114	0,499
19-Jul	289,39	104,83	0,371	4,254	0,015	0,100	3,104	320,946	0,270 ⁱ
20-Jul	326,52	86,58	0,223	10,276	0,031	0,048 *	4,461	357,557	0,293
21-Jul	315,16	103,64	0,164	5,524	0,018	0,020 *	3,619	348,172	0,165 ⁱ
22-Jul	301,94	98,96	0,743	7,131	0,024	0,272	3,511	335,620	0,756 ⁱ
23-Jul	298,55	105,86	0,516	5,113	0,017	0,146	3,130	331,916	0,414
24-Jul	315,94	106,67	0,290	6,505	0,021	0,069	3,335	352,025	0,274
25-Jul	327,10	98,71	0,337	8,164	0,025	0,088	3,829	361,378	0,372 ⁱ
26-Jul	349,10	91,27	0,399	11,165	0,032	0,121	4,443	382,475	0,471
27-Jul	343,90	75,76	0,991	19,260	0,056	0,879	5,081	374,113	0,989
28-Jul	332,23	88,06	0,814	11,955	0,036	0,432	4,371	365,242	0,887
29-Jul	340,30	75,89	0,387	15,315	0,045	0,157	5,365	368,806	0,569
30-Jul	331,00	101,84	0,648	5,825	0,018	0,124	3,717	363,520	0,589 ⁱ
31-Jul	344,97	94,71	0,402	8,516	0,025	0,068	4,225	377,864	0,419

*Rejeita-se H_0 a um nível de significância de 0,05.

ⁱValores estimados por intermédio de otimização.

Tabela 20 - Valores das estimativas dos parâmetros média (μ) e desvio padrão (σ) para a distribuição normal, forma (α) e taxa (λ) para a distribuição gama e forma (α) e escala (β) para a distribuição Weibull, com seus respectivos “valor p” do teste de aderência (Kolmogorov-Smirnov). Valores referentes à análise estatística para a série histórica diária de radiação solar global ($\text{cal cm}^{-2} \text{d}^{-1}$) em Piracicaba (SP).
Série histórica: 31 anos, mês: Agosto

Dia	Normal			Gama			Weibull		
	μ	σ	valor p	$\alpha(\text{forma})$	$\lambda(\text{taxa})$	valor p	$\alpha(\text{forma})$	$\beta(\text{escala})$	valor p
1-Ago	353,81	94,36	0,440	9,366	0,026	0,135	4,545	386,743	0,569
2-Ago	330,97	106,65	0,132	7,195	0,022	0,045 *	3,728	367,904	0,152
3-Ago	307,32	93,78	0,542	9,403	0,031	0,283	3,696	341,254	0,624
4-Ago	370,16	77,07	0,961	19,274	0,052	0,791	5,562	400,308	0,913
5-Ago	358,29	114,44	0,193	5,947	0,017	0,020 *	3,607	395,224	0,175 ⁱ
6-Ago	374,48	102,61	0,509	6,769	0,018	0,089	4,107	408,412	0,457
7-Ago	380,74	84,45	0,298	12,380	0,033	0,044 *	5,263	410,777	0,302
8-Ago	345,55	109,30	0,143	5,826	0,017	0,011 *	3,623	380,493	0,121 ⁱ
9-Ago	339,61	108,17	0,841	6,246	0,018	0,221	3,658	375,141	0,843 ⁱ
10-Ago	340,61	106,99	0,112	7,024	0,021	0,020 *	3,919	377,136	0,158
11-Ago	371,87	74,76	0,795	23,184	0,062	0,641	5,506	402,031	0,955
12-Ago	393,42	83,10	0,974	21,965	0,056	0,997	5,102	427,108	0,905
13-Ago	384,00	72,07	0,668	27,983	0,073	0,484	5,660	413,825	0,535
14-Ago	396,39	135,26	0,236	7,701	0,019	0,390	2,945	442,036	0,243
15-Ago	389,77	100,24	0,438	9,501	0,024	0,113	4,728	424,163	0,559
16-Ago	391,42	91,22	0,907	14,377	0,037	0,571	5,291	425,574	0,903
17-Ago	391,48	107,92	0,514	9,475	0,024	0,154	4,254	429,929	0,615
18-Ago	376,42	93,80	0,837	14,056	0,037	0,491	4,546	412,366	0,894
19-Ago	356,32	113,71	0,286	7,364	0,021	0,075	3,769	395,887	0,364
20-Ago	370,61	118,75	0,294	7,495	0,020	0,066	3,539	411,215	0,282 ⁱ
21-Ago	385,68	123,75	0,107	5,527	0,014	0,012 *	3,543	425,016	0,085 ⁱ
22-Ago	388,84	97,49	0,389	13,708	0,035	0,181	4,395	426,014	0,494
23-Ago	355,13	130,56	0,091	4,470	0,013	0,017 *	3,152	395,202	0,066 ⁱ
24-Ago	392,03	113,10	0,526	7,958	0,020	0,131	4,095	431,433	0,614
25-Ago	376,84	105,36	0,630	7,614	0,020	0,239	4,321	412,590	0,715
26-Ago	408,03	73,69	0,801	32,663	0,080	0,943	5,239	438,977	0,507
27-Ago	393,60	136,01	0,591	8,031	0,020	0,349	2,924	439,659	0,326
28-Ago	380,13	112,53	0,458	7,681	0,020	0,112	3,911	418,470	0,482 ⁱ
29-Ago	384,35	94,14	0,688	14,189	0,037	0,344	4,634	420,271	0,804
30-Ago	414,97	76,27	0,705	29,752	0,072	0,893	5,568	446,863	0,479
31-Ago	369,65	127,96	0,665	6,241	0,017	0,234	3,337	412,192	0,656 ⁱ

*Rejeita-se H_0 a um nível de significância de 0,05.

ⁱValores estimados por intermédio de otimização.

Tabela 21 - Valores das estimativas dos parâmetros média (μ) e desvio padrão (σ) para a distribuição normal, forma (α) e taxa (λ) para a distribuição gama e forma (α) e escala (β) para a distribuição Weibull, com seus respectivos “valor p” do teste de aderência (Kolmogorov-Smirnov). Valores referentes à análise estatística para a série histórica diária de radiação solar global ($\text{cal cm}^{-2} \text{d}^{-1}$) em Piracicaba (SP).
Série histórica: 31 anos, mês: Setembro

Dia	Normal			Gama			Weibull		
	μ	σ	valor p	$\alpha(\text{forma})$	$\lambda(\text{taxa})$	valor p	$\alpha(\text{forma})$	$\beta(\text{escala})$	valor p
1-Set	386,55	124,67	0,810	6,851	0,018	0,318	3,585	428,649	0,822 ⁱ
2-Set	381,60	132,82	0,309	4,754	0,012	0,069	3,311	422,663	0,249 ⁱ
3-Set	390,07	132,07	0,359	6,180	0,016	0,141	3,479	433,826	0,342 ⁱ
4-Set	391,87	115,27	0,939	8,438	0,022	0,754	3,903	432,185	0,955 ⁱ
5-Set	370,57	151,84	0,534	4,232	0,011	0,262	2,715	416,344	0,456 ⁱ
6-Set	387,87	114,32	0,244	7,692	0,020	0,059	4,193	427,254	0,334
7-Set	399,65	143,53	0,860	6,059	0,015	0,383	3,082	446,698	0,793
8-Set	375,39	142,59	0,658	5,896	0,016	0,243	2,873	421,290	0,552 ⁱ
9-Set	414,45	141,54	0,639	7,119	0,017	0,256	3,313	463,605	0,657
10-Set	419,84	148,77	0,462	4,581	0,011	0,137	3,165	465,375	0,360 ⁱ
11-Set	412,16	147,12	0,212	4,974	0,012	0,037 [*]	3,180	458,326	0,166 ⁱ
12-Set	408,42	143,53	0,756	5,078	0,012	0,346	3,220	453,722	0,692 ⁱ
13-Set	381,65	146,36	0,622	4,435	0,012	0,166	2,921	427,540	0,510
14-Set	371,42	148,57	0,334	4,455	0,012	0,105	2,800	416,880	0,261 ⁱ
15-Set	367,74	139,47	0,345	4,265	0,012	0,183	2,978	410,701	0,291
16-Set	387,55	123,96	0,284	6,979	0,018	0,107	3,802	430,156	0,332
17-Set	432,71	132,72	0,466	7,291	0,017	0,110	3,791	477,749	0,494 ⁱ
18-Set	432,13	120,64	0,439	8,679	0,020	0,215	4,205	474,820	0,513
19-Set	415,61	114,90	0,479	8,306	0,020	0,354	4,359	455,779	0,477
20-Set	394,10	145,83	0,112	4,710	0,012	0,019 [*]	3,110	439,471	0,085 ⁱ
21-Set	376,65	146,09	0,345	4,547	0,012	0,120	2,882	421,613	0,263 ⁱ
22-Set	417,97	128,59	0,750	9,287	0,022	0,616	3,636	463,927	0,691 ⁱ
23-Set	417,55	144,30	0,220	5,914	0,014	0,039 [*]	3,269	464,593	0,189 ⁱ
24-Set	391,58	117,34	0,990	10,308	0,026	0,849	3,708	434,963	0,992
25-Set	390,48	172,30	0,624	3,696	0,009	0,196	2,470	440,446	0,443
26-Set	400,77	156,89	0,916	4,801	0,012	0,533	2,858	449,265	0,832
27-Set	401,19	153,76	0,528	5,456	0,014	0,227	2,909	450,355	0,461 ⁱ
28-Set	427,90	159,81	0,252	4,850	0,011	0,080	3,064	478,050	0,203 ⁱ
29-Set	382,16	183,54	0,944	3,577	0,009	0,832	2,243	437,392	0,954
30-Set	402,48	167,93	0,928	4,404	0,011	0,508	2,585	454,257	0,932

^{*}Rejeita-se H_0 a um nível de significância de 0,05.

ⁱValores estimados por intermédio de otimização.

Tabela 22 - Valores das estimativas dos parâmetros média (μ) e desvio padrão (σ) para a distribuição normal, forma (α) e taxa (λ) para a distribuição gama e forma (α) e escala (β) para a distribuição Weibull, com seus respectivos “valor p” do teste de aderência (Kolmogorov-Smirnov). Valores referentes à análise estatística para a série histórica diária de radiação solar global ($\text{cal cm}^{-2} \text{d}^{-1}$) em Piracicaba (SP).
Série histórica: 31 anos, mês: Outubro

Dia	Normal			Gama			Weibull		
	μ	σ	valor p	$\alpha(\text{forma})$	$\lambda(\text{taxa})$	valor p	$\alpha(\text{forma})$	$\beta(\text{escala})$	valor p
1-Out	410,16	173,40	0,287	3,887	0,009	0,117	2,634	461,330	0,210
2-Out	387,58	139,37	0,814	6,013	0,016	0,465	3,214	433,657	0,712 ⁱ
3-Out	424,90	134,03	0,409	6,744	0,016	0,132	3,787	469,842	0,447 ⁱ
4-Out	473,10	108,11	0,856	14,554	0,031	0,493	5,076	513,582	0,957
5-Out	427,06	127,01	0,242	6,523	0,015	0,107	4,013	469,530	0,253
6-Out	408,42	113,21	0,740	9,624	0,024	0,341	4,287	449,262	0,865
7-Out	408,52	146,35	0,426	5,693	0,014	0,126	3,207	456,170	0,391 ⁱ
8-Out	418,87	157,78	0,570	4,778	0,011	0,100	3,002	468,876	0,485
9-Out	441,94	137,18	0,986	8,239	0,019	0,634	3,675	489,886	0,991 ⁱ
10-Out	446,26	144,57	0,449	5,510	0,012	0,090	-	-	-
11-Out	456,20	129,98	0,131	7,859	0,017	0,045 *	4,402	500,545	0,131
12-Out	455,42	147,93	0,373	6,941	0,015	0,193	3,692	505,632	0,388 ⁱ
13-Out	432,07	128,73	0,777	9,592	0,022	0,496	3,933	479,325	0,862
14-Out	453,58	149,31	0,791	6,995	0,015	0,298	3,334	505,003	0,739
15-Out	421,06	159,02	0,409	5,139	0,012	0,079	2,918	471,054	0,298 ⁱ
16-Out	427,26	160,19	0,581	4,841	0,011	0,125	3,029	478,008	0,497
17-Out	413,16	167,66	0,984	4,928	0,012	0,655	2,697	466,550	0,959
18-Out	425,84	128,12	0,886	9,935	0,023	0,942	3,737	472,395	0,908 ⁱ
19-Out	391,03	168,91	0,855	3,919	0,010	0,315	2,489	439,809	0,636
20-Out	447,39	163,10	0,597	5,073	0,011	0,294	3,115	498,982	0,523 ⁱ
21-Out	479,55	144,30	0,436	9,126	0,019	0,156	3,923	531,179	0,543 ⁱ
22-Out	497,03	130,90	0,409	11,238	0,023	0,358	4,658	545,095	0,451
23-Out	478,26	156,74	0,252	6,541	0,014	0,080	3,692	530,799	0,244 ⁱ
24-Out	472,23	151,80	0,569	6,179	0,013	0,119	3,689	522,001	0,597 ⁱ
25-Out	437,03	159,12	0,825	5,772	0,013	0,464	3,116	488,949	0,785
26-Out	429,84	159,52	0,876	6,084	0,014	0,461	3,045	483,645	0,865
27-Out	463,10	170,00	0,813	5,991	0,013	0,300	3,018	518,566	0,719 ⁱ
28-Out	485,48	143,93	0,762	9,053	0,019	0,404	3,836	536,518	0,817 ⁱ
29-Out	505,45	134,70	0,595	10,558	0,021	0,212	4,434	554,642	0,736
30-Out	444,00	144,80	0,330	7,440	0,017	0,163	3,557	493,899	0,351 ⁱ
31-Out	475,39	119,27	0,910	15,912	0,033	0,985	4,203	520,956	0,975

*Rejeita-se H_0 a um nível de significância de 0,05.

ⁱValores estimados por intermédio de otimização.

Tabela 23 - Valores das estimativas dos parâmetros média (μ) e desvio padrão (σ) para a distribuição normal, forma (α) e taxa (λ) para a distribuição gama e forma (α) e escala (β) para a distribuição Weibull, com seus respectivos “valor p” do teste de aderência (Kolmogorov-Smirnov). Valores referentes à análise estatística para a série histórica diária de radiação solar global ($\text{cal cm}^{-2} \text{d}^{-1}$) em Piracicaba (SP). Série histórica: 31 anos, mês: Novembro

Dia	Normal			Gama			Weibull		
	μ	σ	valor p	$\alpha(\text{forma})$	$\lambda(\text{taxa})$	valor p	$\alpha(\text{forma})$	$\beta(\text{escala})$	valor p
1-Nov	488,97	136,02	0,729	10,962	0,022	0,377	4,284	539,948	0,827
2-Nov	477,00	146,33	0,942	8,999	0,019	0,918	3,790	529,332	0,931 ⁱ
3-Nov	473,19	147,96	0,723	9,409	0,020	0,726	3,643	527,473	0,716
4-Nov	442,13	168,42	0,403	4,961	0,011	0,180	2,938	495,070	0,336 ⁱ
5-Nov	470,06	157,24	0,627	6,401	0,014	0,278	3,518	522,599	0,609 ⁱ
6-Nov	465,58	170,69	0,991	6,246	0,013	0,895	3,010	521,657	0,990 ⁱ
7-Nov	486,67	147,52	0,524	9,672	0,020	0,190	4,077	525,933	0,536
8-Nov	538,60	121,87	0,868	17,963	0,033	0,585	4,899	587,056	0,929
9-Nov	499,26	149,64	0,353	8,267	0,017	0,091	4,089	552,440	0,507
10-Nov	463,26	143,76	0,262	7,319	0,016	0,063	3,899	512,080	0,323 ⁱ
11-Nov	434,35	141,66	0,711	7,432	0,017	0,293	3,581	483,197	0,736 ⁱ
12-Nov	450,29	146,01	0,386	6,666	0,015	0,096	3,693	499,260	0,438 ⁱ
13-Nov	437,39	145,11	0,662	7,482	0,017	0,386	3,529	487,634	0,682 ⁱ
14-Nov	449,65	162,39	0,471	5,526	0,012	0,101	3,193	502,227	0,436 ⁱ
15-Nov	467,00	166,12	0,466	6,304	0,013	0,183	3,241	522,450	0,456 ⁱ
16-Nov	491,93	131,43	0,882	11,863	0,024	0,718	4,174	540,463	0,846 ⁱ
17-Nov	510,65	145,33	0,416	10,178	0,020	0,149	4,098	563,273	0,517 ⁱ
18-Nov	487,55	161,01	0,932	6,607	0,014	0,149	3,461	541,444	0,921 ⁱ
19-Nov	470,55	159,02	0,569	7,073	0,015	0,191	3,444	524,957	0,604 ⁱ
20-Nov	508,55	140,78	0,579	9,943	0,020	0,210	4,401	559,847	0,777
21-Nov	506,03	118,64	0,184	15,136	0,030	0,125	5,485	551,416	0,274
22-Nov	496,77	126,09	0,989	14,027	0,028	0,827	4,454	545,605	0,942
23-Nov	510,58	108,84	0,677	21,298	0,042	0,891	5,064	555,028	0,453
24-Nov	503,16	138,55	0,882	10,185	0,020	0,417	4,357	553,936	0,973
25-Nov	477,19	152,27	0,673	7,903	0,017	0,326	3,647	530,231	0,727 ⁱ
26-Nov	459,26	151,19	0,803	7,232	0,016	0,343	3,387	511,897	0,798
27-Nov	506,03	152,95	0,861	9,375	0,019	0,956	3,727	560,908	0,829 ⁱ
28-Nov	508,23	146,10	0,766	10,062	0,020	0,585	4,192	562,436	0,813
29-Nov	531,73	105,86	0,976	23,278	0,044	0,946	5,845	574,928	0,979
30-Nov	500,77	141,82	0,704	10,351	0,021	0,308	4,064	552,296	0,787 ⁱ

*Rejeita-se H_0 a um nível de significância de 0,05.

ⁱValores estimados por intermédio de otimização.

Tabela 24 - Valores das estimativas dos parâmetros média (μ) e desvio padrão (σ) para a distribuição normal, forma (α) e taxa (λ) para a distribuição gama e forma (α) e escala (β) para a distribuição Weibull, com seus respectivos “valor p” do teste de aderência (Kolmogorov-Smirnov). Valores referentes à análise estatística para a série histórica diária de radiação solar global ($\text{cal cm}^{-2} \text{d}^{-1}$) em Piracicaba (SP).
Série histórica: 31 anos, mês: Dezembro

Dia	Normal			Gama			Weibull		
	μ	σ	valor p	$\alpha(\text{forma})$	$\lambda(\text{taxa})$	valor p	$\alpha(\text{forma})$	$\beta(\text{escala})$	valor p
1-Dez	487,06	167,21	0,173	6,300	0,013	0,044 *	3,383	542,762	0,172 ⁱ
2-Dez	472,16	142,87	0,948	8,907	0,019	0,559	3,752	522,868	0,963 ⁱ
3-Dez	492,06	118,97	0,970	15,461	0,031	0,735	4,731	538,601	0,941
4-Dez	475,61	138,99	0,731	9,660	0,020	0,426	4,081	526,669	0,659
5-Dez	470,42	163,11	0,948	5,856	0,012	0,415	3,228	523,563	0,929 ⁱ
6-Dez	453,42	101,22	0,824	19,418	0,043	0,589	4,804	494,346	0,721
7-Dez	460,23	153,32	0,744	8,347	0,018	0,858	3,287	515,037	0,652
8-Dez	466,55	135,79	0,736	9,595	0,021	0,345	4,031	515,394	0,841 ⁱ
9-Dez	442,74	150,91	0,973	6,160	0,014	0,451	-	-	-
10-Dez	445,71	126,63	0,724	12,727	0,029	0,967	3,726	492,363	0,649
11-Dez	407,26	141,85	0,908	8,083	0,020	0,864	3,095	455,662	0,892
12-Dez	419,29	131,81	0,876	8,587	0,020	0,797	3,526	465,635	0,827 ⁱ
13-Dez	425,84	163,47	0,981	5,111	0,012	0,658	2,915	477,508	0,972 ⁱ
14-Dez	418,61	145,06	0,619	6,835	0,016	0,555	3,307	467,816	0,613 ⁱ
15-Dez	452,65	123,98	0,990	12,548	0,028	0,993	4,051	500,126	0,938
16-Dez	466,39	123,46	0,957	13,442	0,029	0,995	4,102	513,261	0,892
17-Dez	465,19	160,75	0,615	6,235	0,013	0,166	3,321	518,560	0,595 ⁱ
18-Dez	452,61	151,67	0,940	7,722	0,017	0,690	3,349	506,309	0,902
19-Dez	491,06	157,76	0,720	6,562	0,013	0,265	-	-	-
20-Dez	507,97	128,98	0,916	14,288	0,028	0,855	4,556	558,396	0,943
21-Dez	486,35	132,60	0,804	9,711	0,020	0,349	4,467	534,046	0,939
22-Dez	481,67	142,19	0,803	9,592	0,020	0,623	3,986	533,969	0,824
23-Dez	484,58	141,58	0,497	10,839	0,022	0,729	3,859	537,778	0,494
24-Dez	457,19	119,73	0,576	11,952	0,026	0,256	4,713	501,633	0,771
25-Dez	475,45	157,12	0,862	7,477	0,016	0,389	3,308	528,908	0,798
26-Dez	470,84	133,37	0,844	10,828	0,023	0,561	4,097	520,706	0,942
27-Dez	480,29	115,57	0,687	13,588	0,028	0,352	5,015	523,814	0,889
28-Dez	504,84	144,04	0,625	10,374	0,021	0,587	4,148	558,503	0,678
29-Dez	481,03	168,78	0,640	6,898	0,014	0,745	3,246	539,904	0,664 ⁱ
30-Dez	492,97	155,57	0,952	8,743	0,018	0,926	3,602	548,295	0,945 ⁱ
31-Dez	485,55	138,64	0,985	10,033	0,021	0,814	4,092	536,706	0,977

*Rejeita-se H_0 a um nível de significância de 0,05.

ⁱValores estimados por intermédio de otimização.

5.2 Simulações

É interessante que os modelos de simulação de crescimento e desenvolvimento de culturas sejam ajustados (calibrados), a fim de que os valores dos parâmetros de cultura e das variáveis de entrada forneçam resultados que melhor representem os valores observados. Assim, diante das imprecisões a que estão sujeitos os resultados obtidos a partir de calibrações, há a necessidade de implementar métodos que permitam a avaliação das incertezas - neste caso, abordada sob a ótica dos elementos do clima.

Portanto, o conhecimento das funções de distribuição de probabilidade que mais se adequam aos dados meteorológicos, bem como as estimativas de seus parâmetros, é essencial para o processo de simulação de situações distintas.

A Tabela 25 apresenta os valores mensais máximo, médio e mínimo das estimativas dos parâmetros originais das temperaturas média, mínima e máxima, radiação solar global, com suas respectivas observações limítrofe (menor e maior valor diário), desvio padrão, bem como covariância e correlação entre as variáveis em questão. Como abordado no item 4.1, as séries referentes às temperaturas foram provenientes de três bancos de dados distintos (média, mínimo e máximo); já a radiação solar tem como origem um único conjunto de dados.

Tanto para as temperaturas (média, máxima e mínima) quanto para a radiação solar global, os limites inferior e superior das séries foram “truncados” para evitar valores “extremos” (incoerentes com a realidade) nas caudas; alguns, como no caso da temperatura média, até aceitáveis, mas outros, sobretudo para a radiação solar cuja amplitude de valores é elevada, são “fisicamente” difíceis de serem observados. O critério adotado foi uma tolerância de 30% a menos no limite inferior e 30% a mais no superior. Este critério foi arbitrário e o mais próximo à limitação pelo desvio padrão (DP) ($\pm 1,96$), que no caso das séries de temperaturas mínima, máxima e radiação solar, gerou valores ainda mais extremos (ex: temperatura mínima de -11°C , por exemplo). Para a série de temperatura média, inclusive, este critério foi bastante similar ao DP ($\pm 1,96$), e foi adotado para todas as séries por uma questão de padronização.

Sendo a radiação solar a maior fonte de energia para a Terra e também o principal elemento do clima que afeta outros elementos, como a temperatura, a correlação existente entre esses elementos se torna importante como justificativa para o uso da distribuição normal bivariada.

Na série em questão, as correlações positivas são observadas entre a primavera e verão, ou seja, no período mais quente do ano, sobretudo entre janeiro e março; em contrapartida, a maior incidência de valores negativos ocorre entre abril e setembro. Em observação da série histórica diária, em apenas 63 dias houve correlação positiva para os valores críticos do coeficiente de correlação de Pearson, com $n-2=29$ (série histórica de 31 anos) e $\alpha=0,05$ (valor Tabelado acima de 0,396), sendo 17 dias em janeiro, 22 dias em fevereiro, 6 dias em março, 1 dia em junho e agosto, 3 dias em julho, 2 dias em setembro, outubro e novembro e 7 dias em dezembro. Ressalta-se que, mesmo havendo correlação entre as variáveis explicada por princípios “físicos”, nem sempre a relação entre elas é “linear”, sendo necessárias outras técnicas de abordagem.

Como visto no item 3.2.2, a radiação solar global que chega até a superfície terrestre é composta por duas fases, a direta e a difusa, e sofre grandes variações temporais em função das condições atmosféricas e da época do ano. Portanto, em dias nublados, o valor da radiação solar global é menor, uma vez que a proporção de radiação difusa é maior que a direta. O mesmo raciocínio aplica-se à duração do dia (fotoperíodo), que depende da declinação solar e latitude e, portanto, para as nossas condições, é menor entre os equinócios (21/3 e 23/9), atingindo o pico máximo no solstício de verão.

Em análise dos dados históricos diários de temperatura média do ar em Piracicaba, tem-se que o menor registro reportado foi de 7,0°C, o maior de 30,05°C e a média de 22,11°C. Quanto à radiação solar global, o menor valor reportado foi 24 cal cm⁻² d⁻¹, o maior 891 cal cm⁻² d⁻¹, sendo a média 396,93 cal cm⁻² d⁻¹.

A simulação dos elementos do clima foi realizada em cadência diária, sendo essa análise melhor visualizada por meio dos valores médios mensal e anual (Tabelas 26 a 31), bem como análises estatísticas (Figuras 12,13 e 14); porém, os comentários que seguem também fazem referência às observações diárias dentro de cada mês.

Tabela 25 – Estimativas dos parâmetros originais das temperaturas média (μ), mínima (Mín) e máxima do ar (Máx), radiação solar média (μ), desvio padrão (σ) e observações limítrofes (Menor e Maior), covariância (COV) e correlação (r) entre as variáveis temperaturas média do ar ($^{\circ}\text{C}$) e radiação solar global ($\text{cal cm}^{-2} \text{d}^{-1}$), em Piracicaba (SP). Série histórica: 31 anos

Mês	Temperatura do ar					Radiação solar				COV	r
		μ	σ	Mín.	Máx.	μ	σ	Menor	Maior		
Jan	Maior	25,51	2,17	19,98	31,25	473,94	162,07	250,00	798,00	228,15	0,73
	Média	24,89	1,71	19,53	30,37	436,45	139,40	159,65	708,87	101,81	0,39
	Menor	24,20	1,35	19,11	29,22	372,19	112,09	69,00	616,00	37,33	0,11
Fev	Maior	25,73	2,08	19,87	31,90	486,45	159,39	272,00	802,00	170,41	0,77
	Média	25,25	1,54	19,46	31,02	449,06	132,91	165,14	713,25	106,83	0,50
	Menor	24,69	0,99	18,97	30,19	416,80	100,74	75,00	627,00	56,52	0,23
Mar	Maior	25,26	1,95	19,44	31,19	453,65	141,04	246,00	858,00	187,78	0,69
	Média	24,62	1,50	18,66	30,41	409,81	116,69	150,68	642,87	53,33	0,18
	Menor	23,98	0,94	18,01	29,28	370,06	96,71	66,00	564,00	-34,73	-0,28
Abr	Maior	24,36	2,69	18,07	30,62	428,26	133,07	235,00	660,00	93,18	0,38
	Média	22,78	1,94	16,42	29,10	380,47	99,49	130,40	577,13	-3,51	-0,06
	Menor	20,98	1,32	14,69	26,93	341,71	73,63	80,00	499,00	-42,84	-0,31
Mai	Maior	20,87	3,26	14,18	27,68	368,55	126,46	159,00	724,00	65,02	0,29
	Média	19,57	2,29	12,91	26,20	316,16	93,64	93,19	498,00	-11,91	-0,06
	Menor	18,26	1,89	11,61	24,84	275,90	70,09	38,00	397,00	-96,22	-0,39
Jun	Maior	18,83	2,99	11,93	25,97	332,00	102,06	248,00	539,00	104,43	0,45
	Média	18,11	2,48	10,91	25,37	296,03	81,60	83,23	446,97	2,15	0,02
	Menor	17,53	1,86	10,15	24,51	256,81	44,33	24,00	378,00	-53,07	-0,24
Jul	Maior	19,35	3,39	11,95	26,90	349,10	110,08	204,00	548,00	125,96	0,43
	Média	18,06	2,60	10,60	25,63	314,57	88,36	91,13	481,58	16,71	0,07
	Menor	16,75	1,58	9,33	24,12	281,93	39,49	36,00	385,00	-64,44	-0,31
Ago	Maior	21,08	2,96	13,23	29,62	414,97	136,01	293,00	891,00	200,57	0,59
	Média	19,54	2,50	11,66	27,58	373,31	102,56	117,42	590,77	15,52	0,04
	Menor	18,18	1,82	10,28	25,86	307,32	72,07	31,00	498,00	-85,07	-0,36
Set	Maior	22,75	3,21	15,63	29,36	432,71	183,54	188,00	797,00	209,83	0,54
	Média	21,25	2,65	14,12	28,22	397,67	141,37	89,60	654,87	61,96	0,15
	Menor	19,84	1,86	12,59	27,20	367,74	114,32	47,00	556,00	-105,27	-0,32
Out	Maior	24,17	3,21	17,57	31,11	505,45	173,40	276,00	845,00	191,54	0,50
	Média	23,00	2,44	16,47	29,64	443,13	145,13	118,58	709,06	59,73	0,13
	Menor	21,58	1,57	15,22	27,99	387,58	108,11	45,00	582,00	-48,86	-0,19
Nov	Maior	24,73	2,83	18,45	31,52	538,60	170,69	293,00	870,00	241,82	0,59
	Média	24,04	2,09	17,68	30,28	483,75	144,35	174,93	745,27	45,05	0,13
	Menor	23,47	1,32	16,95	29,10	434,35	105,86	73,00	662,00	-71,20	-0,34
Dez	Maior	24,82	2,13	19,24	30,92	507,97	168,78	262,00	882,00	157,10	0,59
	Média	24,42	1,71	18,79	30,16	466,89	141,19	167,97	727,65	60,45	0,23
	Menor	23,94	1,16	18,02	29,53	407,26	101,22	84,00	644,00	-56,11	-0,18
Ano	Média	22,11	2,12	15,58	28,65	396,93	118,80	128,29	624,17		

Os principais resultados obtidos por intermédio da distribuição normal bivariada na simulação das temperaturas média, mínima e máxima, e respectivos valores de desvio padrão e o erro relativo percentual (ER), são apresentados na Tabela 26. Nesta, observa-se que a média anual das temperaturas média, mínima e máxima simuladas foi idêntica às médias originais, respectivamente 22,11, 15,58 e 28,65°C. Os ER para as três temperaturas simuladas foram, em média, inferiores a 0,4%, sendo o maior ER de 1,06% para a temperatura média (22/7); 3,48% para a temperatura mínima (14/7) e 1,84% o maior percentual do ER obtido na simulação da temperatura máxima (23/8). Quanto aos desvios padrão, foram obtidos os valores de 2,15, 2,32 e 3,27 para as temperaturas média, mínima e máxima, respectivamente (média anual).

Nas Tabelas 27 e 28, encontram-se os principais resultados das simulações obtidos por intermédio das distribuições gama e Weibull, contendo os valores médio, máximo e mínimo para as séries de temperaturas média e máxima, com seus respectivos desvios padrão e ER. Salienta-se que ambas as distribuições não simulam dados negativos e, portanto, não foi possível simular as temperaturas mínimas, uma vez que a série histórica analisada possui valores inferiores a 0°C em dois anos distintos (1981 e 1994). Esta é uma limitação das distribuições gama e Weibull comparadas à normal bivariada, sobretudo para a simulação das temperaturas em regiões com o clima mais ameno, onde a ocorrência de temperaturas negativas possa ser comum.

Como pode ser observado na Tabela 27, a média anual da temperatura máxima simulada por meio da distribuição gama foi a mesma reportada pela normal bivariada e, por conseguinte, aos valores originais; desempenho similar também foi notado na média anual da temperatura média (22,10°C) obtidos nesta simulação, comparados aos 22,11°C dos valores reais (média anual). O maior ER para a temperatura média foi observado em 29/6 (1,28%) enquanto que para a temperatura máxima o maior ER ocorreu em 12/9 (1,45%). Na média anual, os ER de ambos os parâmetros foram inferiores a 0,30% enquanto os desvios padrão foram, respectivamente para a temperatura média e máxima, 2,17 e 3,32.

Em relação à distribuição Weibull, nota-se que os valores simulados são bastante próximos aos originais em termos de média anual; contudo, a amplitude nos valores estimados é maior do que nas outras simulações; por exemplo, a média da temperatura em determinado dia é 22°C composto pelos valores 23; 23; 24 e 18. Na outras simulações a média também é 22°C, mas composta pelos valores 22,5; 21,5; 23 e 21. Esta simulação foi a que apresentou os maiores ER em alguns dias do ano para a temperatura média.

Tabela 26 – Valores simulados médios das temperaturas média (μ), mínima (Mín) e máxima (Máx) do ar, em °C, e seus respectivos valores de erro relativo percentual (ER) e desvio padrão (σ) obtidos por meio da distribuição normal bivariada, em Piracicaba (SP)

Temperatura do ar - Normal Bivariada										
Mês		μ	ER	σ	Máx.	ER	σ	Mín.	ER	σ
Jan	Maior	25,52	0,45%	2,18	31,31	0,63%	3,91	19,99	0,55%	1,89
	Média	24,90	0,13%	1,73	30,38	0,19%	2,82	19,54	0,18%	1,45
	Menor	24,23	0,01%	1,38	29,18	0,01%	2,12	19,18	0,01%	1,11
Fev	Maior	25,66	0,36%	2,11	31,80	0,64%	3,42	19,85	0,47%	1,73
	Média	25,25	0,13%	1,57	31,02	0,19%	2,70	19,45	0,15%	1,39
	Menor	24,72	0,00%	1,00	30,24	0,01%	1,72	19,01	0,00%	0,94
Mar	Maior	25,26	0,44%	1,98	31,20	0,84%	3,50	19,42	0,71%	2,10
	Média	24,62	0,14%	1,51	30,40	0,22%	2,61	18,66	0,20%	1,55
	Menor	24,03	0,00%	0,95	29,38	0,02%	1,53	18,02	0,01%	1,01
Abr	Maior	24,33	0,73%	2,61	30,54	0,47%	3,49	18,10	1,30%	3,18
	Média	22,77	0,23%	1,95	29,09	0,21%	2,71	16,40	0,34%	2,26
	Menor	21,09	0,01%	1,31	27,04	0,01%	1,86	14,73	0,02%	1,46
Mai	Maior	20,97	0,75%	3,29	27,73	0,96%	3,89	14,31	1,46%	3,42
	Média	19,58	0,27%	2,31	26,19	0,24%	3,08	12,90	0,48%	2,85
	Menor	18,33	0,01%	1,87	24,86	0,00%	2,59	11,58	0,03%	2,18
Jun	Maior	18,93	0,88%	3,15	26,02	0,93%	4,27	12,13	1,70%	3,92
	Média	18,12	0,34%	2,52	25,38	0,25%	3,39	10,95	0,61%	3,10
	Menor	17,37	0,06%	1,86	24,48	0,00%	2,54	10,16	0,00%	2,39
Jul	Maior	19,36	1,06%	3,46	26,93	0,97%	5,13	11,89	3,48%	3,99
	Média	18,08	0,40%	2,63	25,65	0,36%	3,70	10,63	0,76%	3,06
	Menor	16,69	0,01%	1,57	24,08	0,02%	1,72	9,35	0,09%	2,13
Ago	Maior	21,04	0,79%	3,03	29,64	1,84%	5,18	13,28	1,34%	3,57
	Média	19,53	0,27%	2,54	27,56	0,35%	3,90	11,64	0,57%	2,87
	Menor	18,14	0,00%	1,82	25,75	0,01%	3,16	10,26	0,01%	2,42
Set	Maior	22,76	0,88%	3,28	29,24	1,14%	5,36	15,54	1,64%	3,08
	Média	21,25	0,39%	2,70	28,21	0,44%	4,51	14,11	0,56%	2,63
	Menor	19,75	0,00%	1,81	27,09	0,02%	3,15	12,66	0,06%	2,07
Out	Maior	24,23	0,72%	3,33	31,08	0,85%	4,99	17,60	1,40%	2,97
	Média	23,02	0,30%	2,49	29,66	0,35%	3,91	16,49	0,36%	2,42
	Menor	21,55	0,01%	1,61	28,11	0,02%	2,69	15,06	0,02%	1,81
Nov	Maior	24,77	0,87%	2,90	31,53	0,79%	4,32	18,51	0,98%	2,91
	Média	24,01	0,24%	2,13	30,29	0,29%	3,16	17,66	0,33%	2,35
	Menor	23,30	0,00%	1,33	29,00	0,01%	1,72	16,91	0,02%	1,80
Dez	Maior	24,83	0,59%	2,18	31,00	0,73%	3,44	19,29	0,79%	2,47
	Média	24,45	0,21%	1,74	30,20	0,25%	2,75	18,82	0,26%	1,87
	Menor	24,05	0,02%	1,20	29,47	0,00%	1,87	18,09	0,04%	1,40
Ano	Média	22,11	0,25%	2,15	28,65	0,28%	3,27	15,58	0,40%	2,32

Tabela 27 – Valores simulados médios das temperaturas média (μ) e máxima (Máx) do ar, em °C, e seus respectivos valores de erro relativo percentual (ER) e desvio padrão (σ) obtidos por meio da distribuição gama, em Piracicaba (SP)

		Temperatura do ar - Gama					
Mês		μ	ER	σ	Máx.	ER	σ
Jan	Maior	25,55	0,65%	2,16	31,24	0,78%	3,94
	Média	24,90	0,22%	1,74	30,38	0,28%	2,83
	Menor	24,22	0,01%	1,36	29,36	0,01%	2,20
Fev	Maior	25,74	0,32%	2,11	31,82	0,79%	3,32
	Média	25,25	0,12%	1,57	31,03	0,23%	2,67
	Menor	24,61	0,01%	1,01	30,18	0,00%	1,72
Mar	Maior	25,19	0,47%	1,93	31,26	0,60%	3,89
	Média	24,62	0,20%	1,51	30,42	0,21%	2,68
	Menor	23,97	0,00%	0,95	29,22	0,03%	1,60
Abr	Maior	24,33	0,65%	2,75	30,73	0,74%	3,45
	Média	22,77	0,24%	1,98	29,11	0,20%	2,73
	Menor	20,94	0,00%	1,28	26,86	0,01%	1,90
Mai	Maior	20,86	0,92%	3,03	27,67	0,80%	4,11
	Média	19,55	0,34%	2,32	26,19	0,28%	3,10
	Menor	18,15	0,00%	1,89	24,86	0,02%	2,58
Jun	Maior	18,69	1,28%	3,34	25,94	0,95%	4,51
	Média	18,10	0,41%	2,60	25,34	0,32%	3,49
	Menor	17,52	0,01%	1,93	24,39	0,02%	2,60
Jul	Maior	19,41	1,11%	3,76	26,92	1,00%	5,44
	Média	18,06	0,38%	2,70	25,62	0,31%	3,84
	Menor	16,80	0,07%	1,64	24,17	0,01%	1,73
Ago	Maior	21,23	1,14%	3,21	29,57	1,02%	5,65
	Média	19,54	0,40%	2,58	27,59	0,40%	3,99
	Menor	18,07	0,01%	1,81	25,87	0,01%	3,19
Set	Maior	22,87	0,81%	3,20	29,28	1,45%	5,41
	Média	21,24	0,27%	2,68	28,23	0,50%	4,59
	Menor	19,75	0,00%	1,88	27,13	0,02%	3,44
Out	Maior	24,11	0,52%	3,19	30,79	1,03%	5,10
	Média	22,99	0,20%	2,46	29,61	0,33%	3,97
	Menor	21,54	0,00%	1,58	27,73	0,05%	2,58
Nov	Maior	24,80	0,76%	2,87	31,49	1,15%	4,44
	Média	24,01	0,22%	2,11	30,27	0,29%	3,19
	Menor	23,44	0,00%	1,31	29,24	0,00%	1,75
Dez	Maior	24,81	0,49%	2,21	30,91	0,46%	3,60
	Média	24,42	0,20%	1,73	30,17	0,20%	2,77
	Menor	23,86	0,01%	1,23	29,60	0,01%	1,91
Ano	Média	22,10	0,27%	2,17	28,65	0,30%	3,32

Tabela 28 – Valores simulados médios das temperaturas média (μ) e máxima (Máx) do ar, em °C, e seus respectivos valores de erro relativo percentual (ER) e desvio padrão (σ) obtidos por meio da distribuição Weibull, em Piracicaba (SP)

Temperatura do ar - Weibull							
Mês		μ	ER	σ	Máx.	ER	σ
Jan	Maior	24,81	3,24%	2,15	31,24	0,93%	3,86
	Média	24,46	1,73%	1,96	30,36	0,26%	2,83
	Menor	24,03	0,08%	1,72	29,13	0,00%	2,10
Fev	Maior	24,98	3,81%	2,10	31,99	0,93%	3,32
	Média	24,68	2,24%	1,85	31,06	0,31%	2,56
	Menor	24,42	0,11%	1,56	30,28	0,00%	1,68
Mar	Maior	24,87	3,85%	2,06	31,15	0,75%	3,32
	Média	24,13	2,05%	1,74	30,40	0,23%	2,54
	Menor	23,49	0,32%	1,48	29,32	0,02%	1,61
Abr	Maior	23,41	6,28%	2,56	30,61	0,65%	3,30
	Média	21,92	3,78%	2,26	29,11	0,23%	2,58
	Menor	20,34	1,35%	1,78	27,05	0,00%	1,96
Mai	Maior	20,22	5,45%	2,85	27,70	1,01%	3,85
	Média	19,09	2,52%	2,51	26,22	0,34%	3,00
	Menor	17,51	0,06%	2,21	24,79	0,04%	2,41
Jun	Maior	18,11	5,49%	2,83	26,02	1,03%	3,94
	Média	17,74	2,05%	2,50	25,42	0,39%	3,11
	Menor	17,46	0,02%	2,15	24,62	0,01%	2,53
Jul	Maior	18,38	7,62%	3,02	26,85	1,44%	4,40
	Média	17,52	3,20%	2,64	25,67	0,38%	3,44
	Menor	16,42	0,28%	2,16	24,21	0,04%	1,90
Ago	Maior	20,27	6,03%	3,30	29,73	1,55%	4,52
	Média	19,14	2,33%	2,75	27,65	0,47%	3,58
	Menor	17,36	0,01%	2,29	25,83	0,03%	2,61
Set	Maior	21,78	6,91%	3,23	29,65	1,42%	5,15
	Média	20,83	2,17%	2,90	28,30	0,48%	4,40
	Menor	19,90	0,05%	2,60	27,09	0,03%	3,21
Out	Maior	23,16	6,06%	3,33	31,12	1,23%	4,85
	Média	22,38	2,73%	2,87	29,64	0,35%	3,93
	Menor	21,76	0,18%	2,52	28,05	0,02%	2,93
Nov	Maior	23,64	9,87%	2,88	31,62	1,01%	4,19
	Média	23,18	3,58%	2,48	30,24	0,33%	3,21
	Menor	21,62	1,21%	1,91	29,03	0,00%	1,84
Dez	Maior	24,24	3,38%	2,57	30,98	0,99%	3,50
	Média	23,96	1,91%	2,09	30,16	0,26%	2,73
	Menor	23,66	0,41%	1,80	29,56	0,01%	1,87
Ano	Média	21,57	2,52%	2,38	28,67	0,34%	3,16

As Tabelas 29, 30 e 31 apresentam os principais resultados das simulações de radiação solar global por intermédio das três distribuições analisadas. Em função da grande variabilidade na magnitude de seus valores, e pelo fato da radiação máxima e mínima fazer referência aos valores limítrofes da série diária, não há sentido em mostrar os ER destes parâmetros.

Por meio da distribuição normal bivariada (Tabela 29), foram simulados valores de radiação solar global muito próximos aos reais, sendo que a média anual foi de $397,35 \text{ cal cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$, com ER médio de 0,82%. Em apenas três dias do ano o ER foi superior a 3% (19/5 - 3,24%, 2/10 - 3,58% e 19/10 - 3,35%), evidenciando a precisão desta simulação.

A distribuição gama também apresentou desempenho similar à normal bivariada (Tabela 30). Nesta, tem-se que, em média, a radiação solar global simulada foi de $397,05 \text{ cal cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$, contra $396,93 \text{ cal cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (valores observados). O ER médio também foi baixo (0,88%), sendo que os maiores valores foram reportados nos dias 6/1 (3,10%), 29/3 (3,55%), 8/10 (3,11%) e 22/12 (3,05%).

Já a simulação utilizando a distribuição Weibull (Tabela 31) foi a que apresentou os piores resultados, com ER médio anual de 12,68%, sendo que em apenas 109 dias os ER foram inferiores a 10% e em 27 datas, superiores a 20%.

Em relação aos valores limítrofes de radiação solar global, tem-se que a simulação utilizando a distribuição gama apresentou o maior número de ocorrência de valores simulados próximos ao limite superior de truncamento, não sendo raro valores superiores a $1000 \text{ cal cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$ dentre as 1000 simulações diárias. Já em relação à simulação de valores próximos ao limite inferior, a distribuição normal bivariada reportou o maior número de ocorrências.

Tabela 29 – Valores simulados médios de radiação solar global média (μ), com seus respectivos valores limítrofes (Maior e Menor), em $\text{cal cm}^{-2} \text{d}^{-1}$, erro relativo percentual (ER) e desvio padrão (σ) da média para a simulação normal bivariada, em Piracicaba (SP)

		Radiação solar - Normal Bivariada				
Mês		μ	ER	σ	Maior	Menor
Jan	Maior	472,62	1,84%	164,20	1048,52	105,71
	Média	436,75	0,89%	141,68	909,63	37,31
	Menor	377,75	0,04%	113,97	748,77	17,04
Fev	Maior	490,23	1,48%	159,04	951,75	140,58
	Média	449,62	0,70%	133,74	878,77	55,71
	Menor	421,30	0,01%	101,51	752,75	17,01
Mar	Maior	453,43	1,94%	140,34	1006,82	115,75
	Média	408,25	0,85%	117,94	792,40	47,50
	Menor	372,41	0,05%	95,73	671,21	16,98
Abr	Maior	428,37	1,21%	132,43	805,89	164,90
	Média	379,96	0,65%	100,89	702,03	72,53
	Menor	339,47	0,03%	74,20	571,64	16,84
Mai	Maior	365,61	3,24%	124,58	731,24	110,60
	Média	316,64	0,80%	94,14	622,89	44,05
	Menor	279,46	0,00%	71,15	508,49	17,75
Jun	Maior	331,02	1,87%	103,80	706,49	184,66
	Média	295,36	0,65%	82,31	571,43	48,23
	Menor	255,64	0,02%	45,41	479,88	18,35
Jul	Maior	350,12	1,79%	110,43	735,43	165,97
	Média	314,42	0,70%	89,26	608,23	53,12
	Menor	280,70	0,06%	40,36	425,80	16,80
Ago	Maior	414,15	2,50%	136,57	802,04	187,36
	Média	374,23	0,91%	103,17	693,67	68,35
	Menor	309,16	0,13%	73,81	590,77	17,14
Set	Maior	433,11	2,43%	178,11	963,64	77,11
	Média	398,43	1,05%	141,11	866,83	29,21
	Menor	367,93	0,03%	113,33	740,65	17,20
Out	Maior	507,72	3,58%	175,06	1094,26	164,16
	Média	445,02	0,96%	146,44	922,67	40,35
	Menor	401,44	0,01%	111,64	782,10	18,71
Nov	Maior	538,72	2,45%	175,74	1074,51	228,61
	Média	486,13	0,91%	145,61	956,95	58,73
	Menor	435,35	0,02%	105,76	827,13	17,37
Dez	Maior	511,82	2,03%	172,39	1033,11	161,01
	Média	467,52	0,76%	143,16	920,60	58,34
	Menor	412,59	0,03%	101,98	762,39	17,37
Ano	Média	397,35	0,82%	119,87	786,56	51,07

Tabela 30 – Valores simulados médios de radiação solar global média (μ), com seus respectivos valores limítrofes (Maior e Menor), em $\text{cal cm}^{-2} \text{d}^{-1}$, erro relativo percentual (ER) e desvio padrão (σ) da média para a simulação gama, em Piracicaba (SP)

Mês		Radiação solar - Gama				
		μ	ER	σ	Maior	Menor
Jan	Maior	471,93	3,10%	183,44	1156,37	191,17
	Média	436,79	0,92%	149,82	1049,48	103,43
	Menor	377,55	0,01%	117,35	888,35	32,21
Fev	Maior	486,98	2,80%	177,01	1152,97	199,71
	Média	450,34	0,93%	144,77	1031,34	127,55
	Menor	413,74	0,11%	106,86	780,39	60,81
Mar	Maior	450,77	3,55%	160,75	1140,60	181,60
	Média	409,66	0,96%	128,54	951,36	111,68
	Menor	373,00	0,01%	99,91	761,73	60,78
Abr	Maior	432,74	2,49%	155,99	1071,42	208,16
	Média	381,20	0,81%	113,13	869,26	120,54
	Menor	344,32	0,01%	74,30	688,45	50,02
Mai	Maior	374,51	2,04%	136,52	1040,18	154,66
	Média	316,74	0,75%	109,07	789,46	80,58
	Menor	273,35	0,01%	80,52	594,93	20,11
Jun	Maior	332,38	2,75%	133,82	982,25	214,99
	Média	295,98	0,72%	97,04	715,62	82,19
	Menor	258,10	0,03%	44,65	471,04	20,58
Jul	Maior	351,87	2,30%	137,64	992,53	193,34
	Média	314,37	0,84%	105,55	765,66	84,74
	Menor	280,56	0,09%	41,79	462,08	24,21
Ago	Maior	418,24	2,91%	159,54	1152,81	232,20
	Média	372,98	0,93%	120,24	890,20	106,98
	Menor	313,44	0,04%	74,18	643,10	27,52
Set	Maior	432,21	2,41%	196,57	1158,20	131,27
	Média	397,48	0,93%	165,97	1055,97	65,97
	Menor	367,91	0,02%	121,24	939,08	17,32
Out	Maior	508,16	3,11%	202,88	1153,08	199,37
	Média	443,28	1,06%	165,40	1083,70	90,76
	Menor	380,26	0,21%	117,96	944,54	27,09
Nov	Maior	540,30	2,14%	195,07	1157,13	234,06
	Média	484,29	0,89%	159,24	1087,86	132,40
	Menor	434,27	0,02%	110,47	967,91	73,94
Dez	Maior	510,87	3,05%	187,40	1158,25	206,00
	Média	465,70	0,87%	153,79	1054,79	126,79
	Menor	398,75	0,10%	99,92	808,24	37,23
Ano	Média	397,05	0,88%	134,30	944,83	102,62

Tabela 31 – Valores simulados médios de radiação solar global média (μ), com seus respectivos valores limítrofes (Maior e Menor), em $\text{cal cm}^{-2} \text{d}^{-1}$, erro relativo percentual (ER) e desvio padrão (σ) da média para a simulação Weibull, em Piracicaba (SP)

Mês		Radiação solar - Weibull				
		μ	ER	σ	Maior	Menor
Jan	Maior	534,11	31,56%	160,00	1095,76	141,42
	Média	505,09	15,99%	148,03	948,82	85,65
	Menor	470,98	5,30%	132,72	854,93	17,97
Fev	Maior	531,53	19,96%	151,06	1006,12	176,35
	Média	500,80	11,66%	135,24	899,13	92,98
	Menor	482,11	0,48%	116,61	823,71	27,29
Mar	Maior	512,63	23,37%	135,44	891,25	173,24
	Média	469,39	14,65%	113,51	789,67	116,05
	Menor	431,81	3,33%	93,64	694,98	65,27
Abr	Maior	459,53	20,63%	115,65	761,74	181,36
	Média	426,11	12,13%	86,61	659,09	117,05
	Menor	379,72	2,91%	71,08	566,62	41,81
Mai	Maior	394,39	25,81%	85,39	628,49	165,72
	Média	357,00	13,13%	76,17	564,83	100,63
	Menor	323,33	6,90%	68,82	510,97	44,23
Jun	Maior	341,82	23,31%	83,04	582,83	140,29
	Média	326,87	10,66%	69,83	514,98	91,48
	Menor	313,75	0,80%	57,49	478,58	48,00
Jul	Maior	391,89	23,47%	88,76	586,62	164,74
	Média	356,55	13,40%	66,70	532,06	116,73
	Menor	324,07	4,47%	52,77	479,14	52,42
Ago	Maior	450,65	21,99%	105,97	752,20	209,56
	Média	420,33	12,79%	78,38	624,40	141,90
	Menor	374,91	5,00%	59,58	550,70	73,27
Set	Maior	471,35	19,86%	139,98	942,28	149,91
	Média	444,59	11,93%	118,11	784,39	90,44
	Menor	423,74	5,70%	91,41	683,88	31,09
Out	Maior	536,10	21,62%	155,81	1005,81	154,17
	Média	495,92	12,23%	135,15	889,37	95,42
	Menor	457,31	0,88%	114,80	790,34	40,49
Nov	Maior	578,21	22,83%	157,08	1028,83	194,25
	Média	541,78	12,20%	144,83	948,79	106,62
	Menor	503,31	2,56%	123,05	853,95	45,62
Dez	Maior	555,81	25,31%	169,55	1079,91	147,06
	Média	517,66	11,12%	156,52	993,46	78,31
	Menor	476,24	2,28%	143,22	903,29	24,94
Ano	Média	446,53	12,68%	110,62	761,68	102,87

Como a escolha de um determinado método de simulação dos dados deve levar em consideração o maior número de testes estatísticos possíveis, as Figuras 12, 13 e 14 apresentam os diagramas de dispersão referentes ao estudo da regressão linear simples, contendo o coeficiente de determinação (R^2), o índice de concordância ou exatidão de Willmott (d), índice de desempenho de Camargo (c), e coeficiente de correlação de Pearson (r) dos valores simulados em função dos valores observados de temperatura média do ar e de radiação solar global, para cada uma das simulações estudadas (média diária).

Uma forma simples de verificar o tipo de correlação existente entre duas variáveis é através do “diagrama de dispersão” que verifica, empiricamente, se o grau de relacionamento linear entre as variáveis observadas e simuladas é forte ou fraco, conforme o modo como se situam os pontos ao redor de uma reta imaginária que passa através dos pontos. Neste, pode-se estabelecer uma equação matemática que descreva o relacionamento entre duas variáveis (LAPPONI, 1997); assim é possível ajustar uma reta da forma “ $Y = a + b X$ ” aos dados, sendo a o coeficiente linear (intercepto) e b o coeficiente angular da equação. Para realizar a análise com maior rigor e facilitar a interpretação dos resultados, utilizou-se a adoção do coeficiente linear nulo.

Em uma análise de regressão obtém-se, entre outras informações, o coeficiente de determinação ($0 \leq R^2 \leq 1$), que mede a percentagem da explicação “numérica” da variação da variável dependente pela variação das variáveis independentes. Uma opção a este teste é o coeficiente de determinação ajustado (“ R^2 ”), que desconta o efeito de um elevado número de variáveis explicativas.

Um método usualmente conhecido para medir a correlação entre duas variáveis é o coeficiente de correlação linear de Pearson (“r”). A correlação entre as variáveis X e Y é linear perfeita positiva quando $r = 1$ e linear perfeita negativa quando $r = -1$; quando se tem $r = 0$ não existe correlação linear entre as variáveis X e Y.

Quando se relacionam, pela regressão, valores estimados com valores observados - como no presente estudo - podem-se obter informações da precisão e da exatidão que, conjuntamente, indicam a consistência dos dados estimados com os medidos. O índice de concordância de Willmott (“d”) define a precisão dos valores estimados em relação aos observados (o grau de dispersão dos valores em torno da média) e podem variar de zero, para nenhuma concordância, a um, para uma concordância perfeita.

Já o índice de desempenho de Camargo, também conhecido como coeficiente “c” (CAMARGO; SENTELHAS, 1997), é interpretado de acordo com os referidos autores como:

ótimo ($c > 0,85$); muito bom (c entre 0,76 e 0,85); bom (c entre 0,66 e 0,75); mediano (c entre 0,61 e 0,65), sofrível (c entre 0,51 e 0,60), mau (c entre 0,41 e 0,50) e péssimo ($c < 0,40$).

Sendo assim, para a radiação solar global, em ambas as simulações - normal bivariada (Figura 12) e gama (Figura 13) - o modelo prediz a variável simulada em 99,99% e, para a temperatura média do ar, este valor é de 100%. Em ambos os casos o índice d evidenciou que há uma concordância perfeita entre os dados; o índice c também alcançou valores superiores a 0,99 e o coeficiente r mostrou que os valores simulados e observados possuem forte correlação linear (acima de 0,99) nas duas simulações mencionadas.

Os principais resultados da avaliação da simulação utilizando a distribuição Weibull são apresentados na Figura 14. Apesar de todos os índices analisados terem sido “estatisticamente” aceitáveis, os mesmos estão aquém dos obtidos nas demais simulações analisadas, sobretudo para a radiação solar. Dessa maneira, tem-se, respectivamente, para a temperatura média e radiação solar global, R^2 de 0,9997 e 0,9979; d 0,9844 e 0,8567; c 0,9843 e 0,8558 e r de 0,99985 e 0,9989. Em análise da equação matemática, observa-se que, para a temperatura média, o modelo prediz a variável simulada em 97,5%; já para a radiação solar, observa-se a tendência de superestimar os valores simulados em 12,29%.

Estes resultados comprovam a eficiência da distribuição normal bivariada quanto a capacidade de simular dados diários de radiação solar e temperatura média do ar. Não obstante, a simulação utilizando a distribuição gama também pode ser utilizada com sucesso para a simulação de ambas as variáveis, em cadência diária.

Figura 12 – Diagramas de dispersão referentes ao estudo da regressão linear simples, contendo o coeficiente de determinação (R^2), o índice de concordância de Willmott (d), índice de desempenho de Camargo (c), e coeficiente de correlação de Pearson (r) dos valores simulados em função dos valores observados de radiação solar (Q_g) e temperatura média (T), para simulação normal bivariada, em Piracicaba, SP

Figura 13 – Diagramas de dispersão referentes ao estudo da regressão linear simples, contendo o coeficiente de determinação (R^2), o índice de concordância de Willmott (d), índice de desempenho de Camargo (c), e coeficiente de correlação de Pearson (r) dos valores simulados em função dos valores observados de radiação solar (Q_g) e temperatura média (T), para simulação gama, em Piracicaba, SP

Figura 14 – Diagramas de dispersão referentes ao estudo da regressão linear simples, contendo o coeficiente de determinação (R^2), o índice de concordância de Willmott (d), índice de desempenho de Camargo (c), e coeficiente de correlação de Pearson (r) dos valores simulados em função dos valores observados de radiação solar (Qg) e temperatura média (T), para simulação Weibull, em Piracicaba, SP

Outra estatística útil na avaliação das simulações é o teste t para a comparação das médias observadas e simuladas. Este teste verifica a probabilidade da não rejeição da hipótese de nulidade H_0 , que corresponde à igualdade das médias, contra a hipótese alternativa (H_1), que significa que há diferenças entre as mesmas.

A Tabela 32 apresenta os principais resultados do teste t sintetizados por meio do “valor p ” - probabilidade de se obter uma estatística de teste igual ou mais extrema quanto àquela observada em uma amostra, assumindo verdadeira H_0 , para um nível de significância de 5%.

Portanto, tem-se para a simulação da temperatura média do ar que as 3 distribuições apresentaram valor p do teste t superior a 0,05, o que significa a não rejeição da hipótese de nulidade H_0 para todos os dias do ano.

Para a simulação da radiação solar global, tanto a distribuição normal bivariada quanto a gama apresentaram valor p superior ao nível de significância adotado para os 365 dias do ano, ou seja, não se rejeita a hipótese de igualdade entre as médias real e simuladas. Já para a simulação por meio da distribuição Weibull, em apenas 41% dos casos não houve rejeição da hipótese de nulidade H_0 .

Tabela 32 – Resultado do *teste t* sintetizado por meio do “valor p” para as variáveis temperatura média do ar (°C) e radiação solar global (cal cm⁻² d⁻¹) - comparação entre as médias real e simulada por intermédio das distribuições normal bivariada (NB), gama e Weibull, em Piracicaba (SP)

Mês		Temperatura média do ar			Radiação solar global		
		NB	gama	Weibull	NB	gama	Weibull
Jan	Maior	0,997	0,989	0,998	0,992	0,998	0,322
	Média	0,902	0,868	0,857	0,902	0,855	0,040
	Menor	0,651	0,639	0,593	0,700	0,614	0,000
Fev	Maior	0,999	0,999	0,995	0,994	0,994	0,920
	Média	0,883	0,885	0,851	0,901	0,853	0,117
	Menor	0,661	0,644	0,605	0,719	0,609	0,001
Mar	Maior	0,999	0,987	0,993	0,999	0,997	0,563
	Média	0,881	0,879	0,858	0,908	0,868	0,041
	Menor	0,728	0,726	0,575	0,654	0,552	0,000
Abr	Maior	0,994	0,997	0,989	0,996	0,987	0,422
	Média	0,905	0,889	0,890	0,887	0,878	0,079
	Menor	0,728	0,692	0,650	0,688	0,644	0,000
Mai	Maior	0,999	1,000	0,991	0,992	0,987	0,154
	Média	0,881	0,899	0,852	0,910	0,889	0,044
	Menor	0,707	0,755	0,504	0,674	0,587	0,001
Jun	Maior	0,998	0,984	0,992	0,993	0,998	0,753
	Média	0,878	0,857	0,886	0,884	0,872	0,122
	Menor	0,631	0,715	0,721	0,739	0,643	0,000
Jul	Maior	0,990	0,999	0,992	0,996	0,991	0,352
	Média	0,872	0,883	0,870	0,896	0,881	0,048
	Menor	0,719	0,675	0,626	0,720	0,583	0,000
Ago	Maior	0,991	0,995	0,987	0,997	0,990	0,210
	Média	0,902	0,898	0,874	0,911	0,890	0,039
	Menor	0,740	0,711	0,518	0,719	0,666	0,000
Set	Maior	0,998	0,995	0,996	0,998	0,999	0,387
	Média	0,888	0,884	0,866	0,892	0,900	0,115
	Menor	0,688	0,696	0,679	0,689	0,655	0,012
Out	Maior	0,986	1,000	0,995	0,999	0,997	0,837
	Média	0,891	0,892	0,862	0,898	0,868	0,154
	Menor	0,706	0,679	0,502	0,684	0,584	0,003
Nov	Maior	0,995	0,988	0,994	0,998	0,998	0,555
	Média	0,869	0,889	0,868	0,916	0,904	0,094
	Menor	0,554	0,693	0,651	0,791	0,697	0,002
Dez	Maior	0,998	0,994	0,997	0,997	0,998	0,670
	Média	0,900	0,874	0,877	0,880	0,878	0,155
	Menor	0,747	0,590	0,667	0,658	0,724	0,000

Sendo a deficiência hídrica um dos fatores que mais afeta a produtividade das culturas, é essencial incluir a precipitação pluvial nos modelos de crescimento e desenvolvimento de culturas associando, assim, os elementos precipitação e evapotranspiração sobre a produtividade. A ocorrência de precipitação em uma dada região é caracterizada por uma grande variação normalmente “não” distribuída em torno da média (MARQUES JÚNIOR et al., 1994).

A distribuição gama é considerada por Yue et al. (2001), como uma das distribuições mais comumente adotadas na análise de frequência hidrológicas, e para Wilks (1999) é a forma mais comum de representar a distribuição da quantidade de chuva em modelagem estocástica de dados climatológicos. Essa distribuição de probabilidade, segundo Araújo et al. (2001), é a distribuição que melhor explica os resultados de precipitação.

A distribuição gama de dois parâmetros tem sido largamente empregada no ajustamento de frequências de totais de precipitação, observados sob diferentes condições de clima e em intervalos diários, semanais, quinzenais e mensais, e nestas variadas condições mostrou-se adequada para descrever a distribuição das quantidades de chuvas. Segundo Assis (1993) e Sedyama et al. (1995) esta função pode ser considerada a mais adequada para representar a magnitude da chuva de períodos curtos.

Em trabalho para prever a precipitação pluvial mensal provável para Londrina, PR, através da função gama, Ribeiro e Lunardi (1997) constataram que a função de distribuição de probabilidade gama mostrou ser adequada para representar a chuva em todos os meses do ano e que o teste de Kolmogorov-Smirnov comprovou que a série de dados é homogênea.

Neste estudo, a função gama foi utilizada com o artifício da substituição de “excessos de zeros” (dias sem chuvas), por diferentes categorias de valores entre zero e 1,5 que, após a simulação, foram substituídos por zero novamente. Este artifício teve como objetivo evitar o excesso de um único número que pudessem influir na convergência dos dados. As estimativas da ordem de magnitude da precipitação também foram “truncadas”, tendo como limite o valor máximo histórico do dia, assim como os valores máximos mensais (necessário, sobretudo, para os meses de janeiro e dezembro - maior volume de chuvas).

Sendo assim, por comparação de estatísticas básicas (média, mínimo, máximo e frequência) tanto do número de dias no ano com ocorrência de precipitação, quanto a estimativa de sua ordem de magnitude (Figura 15 A e B), tem-se que, de maneira geral, a distribuição gama pode ser utilizada para a simulação da precipitação em uma região. No primeiro caso, os valores médio, mínimo e máximo estimados foram, respectivamente, 115;

92 e 143 dias com ocorrência de chuvas - em linha com os valores observados na série histórica (31 anos) de 118; 93 (em 1984) e 152 dias (em 1983). Quanto às estimativas do volume de precipitação, observa-se que, em média, os valores simulados estão de acordo com as médias mensais históricas; contudo, no tocante à distribuição temporal, ressalta-se que a metodologia em questão não levou em consideração a hipótese de persistência dos dados, na qual a precipitação do dia presente apresenta uma tendência de repetir o evento ocorrido no dia anterior (evento dependente) e que, portanto, seria mais correta e adequada para a simulação da precipitação.

Figura 15 – (A) Histograma de frequência referente à distribuição do número de dias com precipitação durante o ano e (B) *Boxplot* dos valores mensais de precipitação simulados utilizando a distribuição gama (1000 simulações diárias)

5.3 Modelo

Para a estimação da produtividade de cana-de-açúcar, cultivar RB867515, fez-se necessário a obtenção dos seguintes parâmetros de cultura: (i) coeficiente de extinção de luz; (ii) índice de área foliar crítico; (iii) eficiência do uso de radiação; (iv) área foliar específica; (v) temperatura basal inferior; (vi) temperatura basal superior; (vii) temperatura ótima inferior; (viii) temperatura ótima superior; (ix) índice de área foliar inicial; (x) soma térmica referente ao período do plantio à emergência; (xi) soma térmica referente à fase vegetativa (crescimento exponencial e linear - período da emergência ao início da maturação); (xii) soma térmica referente ao período do início da maturação até a colheita; (xiii) taxa relativa de crescimento do IAF inicial; (xiv) coeficiente de partição de biomassa seca para as raízes; (xv) coeficiente de partição de biomassa seca para as folhas; (xvi) coeficiente de partição de biomassa seca para os colmos; (xvii) coeficiente de cultura; e (xviii) coeficiente de sensibilidade ao estresse hídrico.

Para ambas as simulações (cenários A e B), foram utilizados os mesmos valores dos parâmetros de cultura mencionados, diferindo, apenas, quanto aos dados meteorológicos de cada safra e soma térmica.

5.3.1 Coeficiente de extinção luminosa (k , m^2 (solo) m^{-2} (folha)) e Índice de área foliar crítico (IAF_{cr} , $m^2 m^{-2}$)

Alto IAF e a disposição espacial das folhas planófila favorecem a extinção da radiação solar entre as folhas do topo e da base da planta, fazendo com que a porção do dossel vegetativo fotossinteticamente ativo da cana-de-açúcar concentre-se na metade ou terço superior do colmo. Portanto, o ângulo de inserção foliar, juntamente com o índice de área foliar, regula o grau de penetração da radiação no interior da copa da planta, utilizando um coeficiente de extinção luminosa (k) descrito por Monsi e Saeki (1953) citados por Hirose (2005).

Sakai et al. (2009), em estudo com as cultivares IAC91-1099 e SP89-1115 em Piracicaba, utilizaram os ângulos médios de inserção de folha para cálculo do k para as 12 horas nos solstícios de inverno, verão e equinócio, obtendo valores entre 0,44 e 0,74 ao meio dia. Estes pesquisadores observaram que, no solstício de verão e equinócio, os valores de k eram menores que no solstício de inverno para as ambas as cultivares (maior extinção de

radiação durante o inverno em comparação com as demais estações do ano). Nesta pesquisa, o k da cultivar IAC91-1099 foi significativamente menor que o obtido para a variedade cultivada SP89-1115 para qualquer período do ano, devido ao maior ângulo de inserção das folhas.

A dificuldade em medir o ângulo de inserção foliar em plantas de cana-de-açúcar no campo faz com que seja prática a utilização de valores de k que variam entre 0,58 e 0,84, como sugerido por Inman-Bamber (1991) para a variedade cultivada NCo-376 e utilizados por Singels et al. (2008) para parametrização no programa DSSAT/CANEGRO (v.4.5).

Portanto, cada variedade possui um determinado coeficiente de extinção, variável com o desenvolvimento (ZHOU et al., 2003) e ângulo zenital do sol (BOOTE; PICKERING, 1994), apresentando grande variação em função das variedades cultivadas, espaçamento, latitude e horário do dia. Mantendo o espaçamento fixo, possivelmente ocorrerá pequena variação no k das variedades, tendo pouco efeito na fração da radiação solar interceptada, como observado por Muchow et al. (1997).

Quando o IAF atinge o valor de 5,16 é denominado de IAF crítico (RHODES, 1973) e apenas 5% da radiação incidente atingem o solo. Scarpari e Beauclair (2008) verificaram que o valor de $k = 0,58$ é baixo para ser aplicado na modelagem da variedade RB855156 e alto para modelar a variedade SP80-3280 por apresentar um IAF maior que 5,16. Utilizando o máximo valor do IAF obtido na amostragem da variedade SP80-3280, que foi de 6,41, os autores obtiveram um valor empírico de $k = 0,467$ indicativo de folhas mais verticais e melhor aproveitamento da radiação nas folhas baixas.

San José e Medina (1970), estudando a distribuição espacial das folhas com relação à interceptação da radiação na faixa do visível, verificaram o fechamento quase por completo do dossel em IAF maiores que 4. Este valor também foi encontrado por Machado et al. (1985) e por Inman-Bamber (1994), que verificou o fechamento da cultura sombreando as entrelinhas quase completamente, quando o IAF foi superior a 4.

Para Bezuidenhout (2000), superfícies foliares maiores que 4 não aumentam a assimilação. Robertson et al. (1999) encontraram valores maiores de IAF crítico, sendo 4,92 para cultura irrigada e 4,11 para a cultura sob *deficit* hídrico. Em um estudo sobre a aplicação do modelo de *Deardorf* para simulação do balanço de energia da cultura da cana-de-açúcar com a variedade cultivada IAC87-3396 (cana soca), Rolim et al. (2002) obtiveram para o IAF crítico o valor de 4,6. Leme et al. (1984), em estudo com a variedade cultivada CB47-355,

encontraram um IAF crítico de 4,5 para a cana soca, corroborando os resultados encontrados por Almeida et al. (2008).

Machado et al.(1982), constatou-se que a otimização da absorção de energia luminosa no dossel de cana-de-açúcar ocorre quando o IAF varia entre 3 e 7.

Considerando o exposto acima e por meio de calibração, utilizou-se, neste modelo, o valor de k médio de 0,58, considerando que a variedade cultivada RB867515 possui alto IAF e o modelo utiliza um único valor de k durante todo o ciclo, e *IAF crítico* de 6.

5.3.2 Eficiência do uso de radiação (*EUR*, g MJ⁻¹)

Uma das abordagens mais importantes e essenciais para entender o crescimento e produtividade de um cultivo é a eficiência do uso de radiação (*EUR*), relacionada linearmente com a radiação fotossinteticamente ativa absorvida (RFA) (MONTEITH, 1977), na ausência de condições restritivas a seu desenvolvimento. Conceitualmente tem-se a *EUR* como:

$$EUR = \frac{\text{Biomassa total (parte aérea + raízes) OU biomassa da parte aérea}}{\text{Qg interceptada OU absorvida OU RFA interceptada OU absorvida}} \quad (91)$$

As espécies C₄ apresentam valores maiores de *EUR* que espécies C₃, mas que depende da variedade e das condições climáticas do local de cultivo (SINCLAIR; MUCHOW, 1999). De maneira geral, plantas C₃ têm valores de *EUR* entre 2,0 a 3,0 g MJ⁻¹, com base na RFA interceptada (ROSENTHAL; GERIK, 1991), enquanto que nas C₄ os valores da *EUR* variam de 3,0 a 4,0 g MJ⁻¹ (KINIRY et al., 1989).

Para o milho, os valores médios para *EUR* situam-se entre 3,2 a 3,4 g MJ⁻¹ de RFA interceptado para o período vegetativo e 2,6 a 3,4 g MJ⁻¹ de RFA interceptado para todo o ciclo da cultura (SINCLAIR; MUCHOW, 1999).

Dentre os trabalhos com cana-de-açúcar, cuja maioria tem como base a radiação solar global e biomassa da parte aérea, Robertson et al. (1996) reportaram para a cana planta uma *EUR* 8% maior do que no ciclo de cana-soca, respectivamente 1,72 g MJ⁻¹ e 1,59 g MJ⁻¹. Muchow et al. (1994) obtiveram para a variedade cultivada Q96 uma *EUR* de 1,75 g MJ⁻¹. Sinclair e Horie (1989) também encontraram valores semelhantes em algumas plantas C₄, chegando a um valor de 1,7 g MJ⁻¹, valor esse um pouco superior ao encontrado em milho e sorgo por Muchow e Davis (1988), que verificaram que o valor da *EUR* ficaria em torno de 1,6 g MJ⁻¹. Singels e Smit (2002) mencionam valores variando entre 1,72 e 1,25g MJ⁻¹ para a variedade cultivada NCo376, a depender do espaçamento de cultivo, ao passo que os modelos

de simulação de crescimento da cana-de-açúcar APSIM e CANEGRO assumem valores variando de 1,80 a 1,65 g MJ⁻¹ e 1,50 a 1,20 g MJ⁻¹ a depender do ciclo e da idade cultura, respectivamente (SINGELS et al., 2008; KEATING et al., 1999).

Sinclair e Muchow (1999) indicaram algumas razões para explicar as variações na estimativa da *EUR*: (i) radiação expressa com base na radiação total diária ou com base na RFA (50% da radiação total diária); (ii) algumas são expressas como radiação absorvida, enquanto outras, radiação interceptada (pode gerar uma diferença de 5-15%) e; (iii) algumas se baseiam na produção líquida de biomassa seca da planta, descontada a raiz, enquanto outras na produção total de biomassa seca (raízes podem representar até 15% da produção total de biomassa). Sendo assim, há de se ter muita cautela na análise deste parâmetro, visto que a Literatura disponível nem sempre demonstra, claramente, que tipo de radiação e fração de biomassa estão sendo levados em conta para cálculo da *EUR*.

Devido à sensibilidade do modelo a este parâmetro (ver item 5.4), foi obtido, por calibração, o valor de 3,8 g MJ⁻¹ de RFA interceptado para os AP(s) A e B – valor condizente com os principais estudos envolvendo plantas C₄ (considerando a biomassa total) e que foi utilizado, no modelo, até a fase de maturação. A partir de então, em função das limitações climáticas, a planta modifica seu metabolismo básico, canalizando os fotoassimilados produzidos para os tecidos de armazenamento. Considerou-se, para esta fase (mediante a opinião de técnicos do setor e por intermédio de calibração), a produção de biomassa seca total utilizando 20% do valor inicial de *EUR*.

5.3.3 Área foliar específica (*AFE*, m² g⁻¹)

O sucesso na estimação do modelo depende grandemente do cálculo preciso da área foliar. Um método flexível e amplamente aplicado a muitas culturas é a simulação da área foliar baseada no incremento de matéria seca da folha e na área foliar específica (*AFE*). Segundo Radford (1967), a *AFE* representa as diferenças no espessamento foliar, isto é, permite verificar se as plantas estão acumulando fotoassimilados em suas folhas ou translocando-os para outros órgãos.

Segundo Machado (1987), a área foliar individual aumenta inicialmente mais em função do aumento do comprimento da folha e posteriormente em função apenas da largura. Isto acontece porque, no início, a planta busca ocupar rapidamente a área da linha e entrelinha, e depois disso, o aumento da largura ocorre como uma forma de “otimizar” a ocupação do espaço entre perfilhos.

Machado et al. (1982) indicam para a cana-de-açúcar variedade cultivada NA 56-79 em Piracicaba, SP, AFE de $0,010 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$, praticamente independente da idade da cultura - valor este utilizado por diversos autores no uso da modelagem de cana-de-açúcar, como Scarpore (2011) e Oliveira (2010).

Silva et al. (2005) determinaram a AFE ao longo do ciclo da cana-soca (primeiro corte) em 5 variedades cultivadas (RB845197, RB845210, RB855113, RB855536 e RB928064) em Paranavaí, PR, e observaram que o desempenho entre elas foi bastante semelhante, apresentando valores maiores no início do ciclo da cultura, devido ao acúmulo de reservas nas folhas, decrescendo com o desenvolvimento do ciclo. Este decréscimo mostra que a cana-de-açúcar transloca suas reservas das folhas para outras partes (principalmente colmos). Os maiores valores reportados foram 0,040; 0,030; 0,022; 0,018; 0,010 e $0,005 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$, respectivamente em 100, 150, 200, 250, 300 e 350 dias após o corte.

Baseado em Silva et al. (2005), adotou-se no modelo um valor de AFE único e representativo de todo o ciclo ($0,028 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$).

5.3.4 Temperaturas limítrofes para desenvolvimento da cultura ($^{\circ}\text{C}$) e Índice de área foliar inicial ($IAFi$, $\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$)

Com base na Literatura reportada (vide item 3.2.1) adotaram-se os valores de 16°C como temperatura basal inferior, 30 e 34°C , respectivamente, para as temperaturas ótimas para o desenvolvimento da cultura, passando a ocorrer estresse térmico sob condições de temperatura superior a 35°C , com crescimento praticamente nulo acima dos 38°C .

O índice de área foliar na emergência ($IAFi$) foi baseado em Boons-Prins et al. (1993) que obteve, para a cultura do milho, $IAFi$ de $0,0074$ - valor utilizado por Scarpore (2011) em estudo da simulação do crescimento da cana-de-açúcar pelo modelo agrohidrológico SWAP/WOFOST.

5.3.5 Soma térmica ($STem$, $STexp$, $STlin$, $STmat-col$, $^{\circ}\text{C d}$)

Com base nas datas de plantio e início da emergência da variedade cultivada RB867515 safras 2005/2006 e 2010/2011, determinou-se a $STem$ de 191 e 112°C d , respectivamente para os cenários A e B, considerando a temperatura basal de 16°C .

Assumiu-se, amparado em Literatura e na opinião de técnicos da empresa que forneceu estes dados, que a fase de crescimento exponencial (menor crescimento absoluto)

ocorreu nos três meses posteriores à emergência, o que levou a uma ST_{exp} de 333 e 328°C d, respectivamente para os cenários A e B. Foram necessários, para a fase de crescimento linear (ST_{lin}) 1946°C d (cenário A) e 1978°C d (cenário B), considerando que a maturação ocorreu cerca de três meses antes da colheita. Estes valores estão em linha com o estudo reportado por Suguitani (2006) com as variedades cultivadas R-570, RB72454, NCo-376 e SP83-2847 em Piracicaba, SP, que observou, para o ciclo de cana planta, que a primeira variedade teve seu crescimento exponencial em 115-120 dias após o plantio (DAP) e a fase de crescimento linear em 170 DAP.

A soma térmica do início da maturação até o momento de colheita ($ST_{mat-col}$), foi de 213 e 136°C d, respectivamente para os cenários A e B.

5.3.6 Taxa relativa de crescimento do IAF inicial (TRC_{IAF} , (°C d)⁻¹)

A taxa de crescimento relativo do IAF inicial foi calculada considerando o IAF máximo nesta fase igual a um. A TRC_{IAF} foi, então, obtida pelo inverso da soma térmica observada no período entre a emergência até o final do crescimento exponencial, 0,0030 (°C d)⁻¹ para os cenários A e B.

5.3.7 Coeficientes de partição de biomassa

Há uma grande variabilidade da fração de partição de biomassa encontrada na Literatura e que se deve, em sua maioria, a resultados provenientes de diferentes métodos de medida e determinações de biomassa. As informações sobre partição de biomassa utilizada no modelo foram ajustadas conforme estudos de Keating et al.(1999) adaptados por Scarpore (2011), baseado em indicações de que o desempenho varietal é semelhante para partição de fotoassimilados (INMAN-BAMBER et al.,2002).

Dessa maneira, o modelo calcula a biomassa seca inicial das raízes como sendo 37% da biomassa seca das folhas no momento da emergência ($BSFi$) e esta, por sua vez, é obtida por meio da divisão do $IAFi$ pela AFE . A partição para este órgão (raiz) cai para 26% no DVF 0,15; 10% no DVF 0,23; 6% no DVF 0,48, sendo nula após DVF maior que um. Para as folhas, tem-se inicialmente que a partição para este órgão é de 13%, aumentando até DVF 0,23 (40%), sendo mantida em 5% após DVF um. Os colmos recebem a grande parte dos fotoassimilados desde o início do ciclo, sendo que no DVF 0,23 esta fração corresponde a 50% do total, subindo para 77% no DVF 0,48, sendo 95% a partir de DVF um.

5.3.8 Coeficiente de cultura (kc) e coeficiente de sensibilidade ao estresse hídrico (Ky)

Os valores do kc para a cana planta em diferentes períodos de desenvolvimento foram adaptados de Doorenbos e Kassam (1994) e Gouvêa (2009), sendo: 0,4 na fase inicial do desenvolvimento; 0,75 durante o crescimento exponencial; 1,10 durante o crescimento linear e 0,70 durante a maturação. Quanto ao coeficiente de sensibilidade ao estresse hídrico (Ky), utilizou-se a adaptação feita por Santos et al. (2006), e que variam na cana planta da seguinte maneira: 0,75 para emergência e crescimento exponencial; 0,50 para o crescimento linear e 0,10 na fase de maturação.

5.3.9 Abordagem determinística e estocástica

O modelo foi especificado para o cálculo diário da produtividade potencial de biomassa seca (PPs, dependente da interação entre temperatura do ar, fotoperíodo, radiação fotossinteticamente ativa e genótipo), posteriormente deplecionada em função da disponibilidade hídrica (PDs). A produtividade de sacarose, expressa em TPH, foi calculada com base na produtividade potencial referente a biomassa verde de colmos (PPu), também deplecionada em função da disponibilidade hídrica (PDu ou TCH). Para cálculo da PPu e TCH no momento de colheita, o modelo corrige a PPs e PDs para 70% de umidade.

A influência das condições momentâneas da atmosfera (tempo) impactam “diretamente” nas estimativas de PP e PD e, por conseguinte, na estimativa de TPH (produto entre a TCH e $pol/100$). Contudo, neste modelo, o mesmo não ocorre para a estimação da Pol, uma vez que a curva de maturação da variedade cultivada é fixa e, portanto, reflete seu desempenho “médio” observado em diferentes AP(s) na região Centro-Sul (ver item 4.6.3). Ressalta-se que o “ideal” seria a utilização da curva de maturação da variedade cultivada no AP específico, porém, tal informação não foi disponibilizada e, por isso, a utilização da curva de maturação “média” para este genótipo.

Portanto, à título de demonstração, as Tabelas 33 e 34 apresentam a simulação da evolução temporal do acúmulo de biomassa seca de raízes, folhas (total) e colmos, bem como a produtividade de sacarose (TPH_p e TPH), expressa com base na produtividade potencial e deplecionada de colmos. Também são apresentados a estimação dos valores da Pol, do PUI e o indicativo da data ideal de colheita (aquela que potencializa a Pol e a biomassa de colmos), comparada com a data real.

O cenário A refere-se a uma cana de ano e meio com ciclo de 16 meses, plantada em ambiente de produção D em 29/4/2005 e colhida em 17/8/2006.

De acordo com a Tabela 33, a data ideal para a colheita, estimada pelo modelo, ocorreu em 19/9/2006, correspondendo a 71.807 kg ha⁻¹ de biomassa seca de colmos e 21,03 TPH (Pol de 14,58%). A colheita na data real (17/8/2006) correspondeu “hipoteticamente” a 70.571 kg ha⁻¹ de biomassa seca de colmos e a uma TPH de 19,65, considerando a Pol estimada em 13,87%.

Tabela 33 – Evolução temporal do acúmulo de biomassa seca de raízes (*BSR*, kg ha⁻¹), folhas (*BSF*, kg ha⁻¹) e colmos (*BSC*, kg ha⁻¹), período útil de industrialização (*PUI*), Pol (*p*, %), produtividade de sacarose com base na biomassa verde dos colmos (potencial - *TPH_p* e deplecionada - *TPH*, t ha⁻¹) e o indicativo da data ideal de colheita, comparada com a real. Valores simulados correspondentes ao último dia de cada mês - cenário A

	BSR	BSF	BSC	p	TPH_p	TPH	Data de colheita	
Cenário A	kg ha⁻¹	kg ha⁻¹	kg ha⁻¹	%	t ha⁻¹	t ha⁻¹	Real	Ideal
Abril	0,05	0,26	0,00	0,00	0,00			
Maio	0,05	0,26	0,00	0,00	0,00			
Junho	12,86	14,54	29,77	0,00	0,00			
Julho	146,60	182,58	174,06	0,00	0,00			
Agosto	1305,63	1724,94	1593,91	0,00	0,00			
Setembro	3326,57	4989,51	4996,69	0,00	0,00			
Outubro	4403,99	8574,58	9942,65	0,00	0,00			
Novembro	5293,51	11613,35	16986,66	0,00	0,00			
Dezembro	6154,07	13760,95	25525,71	0,00	0,00			
Janeiro	7121,65	15771,92	33739,15	0,00	0,00			
Fevereiro	7726,66	17157,77	41314,79	0,00	0,00			
Março	8152,35	18332,62	50440,70	2,78	4,68			
Abril	8322,72	19058,99	58960,25	9,69	19,04			
Maio	8363,25	19530,04	66653,63	11,28	25,06			
Junho	8363,25	19605,41	68085,70	12,05	27,34			
Julho	8363,25	19681,52	69531,73	13,19	30,56			
PUI Agosto	8363,25	19736,19	70570,52	13,87	32,62	19,65*	17	
Setembro	8363,25	19801,24	71806,52	14,58	34,90	21,03*		19
Outubro	8363,25	19807,15	71918,79	12,29	29,46			

*Ver Tabela 35

O cenário B trata de cana-de-açúcar plantada em 3/5/2010 e colhida em 30/7/2011 o que, segundo a empresa que forneceu estes dados, corresponde, também, a uma cana de ano e meio plantada no final de ciclo (limite), o que é indicado para AP de baixa fertilidade, como o

cenário em questão (E). Esta variedade cultivada apresenta vigoroso crescimento, sendo os AP(s) menos exigentes (C, D e E) os mais indicados para seu cultivo. Em AP de alto potencial de produção, a RB867515 apresenta possibilidades de tombamento, atraso de maturação e incidência de estrias vermelhas, devido à alta produtividade agrícola (RIDESA, 2008). Em função de seu ciclo de maturação ser considerado médio-tardio, esta variedade cultivada tem sua colheita iniciada em julho estendendo-se até novembro sendo, na Usina em questão, os AP(s) D e E preferencialmente colhidos em julho; os AP(s) C, D e E colhidos de agosto a outubro e, em novembro, ocorre a colheita nos AP(s) C e D.

É importante lembrar que o momento ideal de corte é função não somente das características voltadas à produção e rendimento de açúcar, base deste modelo, mas, também, de outros fatores que envolvem a logística da Usina, como distância das áreas até a unidade industrial, caminhões para transporte, capacidade mensal de corte/moagem, carregamento e transporte, preço mensal do açúcar e álcool, custos fixos e variáveis industriais e agrícolas, entre outros. Muitas vezes faz-se necessário a antecipação de corte de determinada variedade cultivada a fim de atender outras exigências que fazem parte do planejamento operacional.

Nos dois cenários, o PUI foi o mesmo (7 de julho até 31 de outubro), em função da utilização da mesma curva de maturação da variedade cultivada RB867515 (média) e do critério de escolha do valor crítico (p_c), arbitrariamente adotado como 12,257 (padrão). Caso o p_c fosse adotado como 14%, por exemplo, o PUI estaria no intervalo entre 21/8 e 12/10.

Conforme mencionado anteriormente, considerado um mesmo AP e genótipo, as variações nas condições do tempo local têm influência no comportamento da curva de maturação que, a priori, também pode ser abordada de maneira estocástica (necessidade de dados históricos). Por exemplo, se o outono/inverno for caracterizado pelo excesso de chuvas e/ou temperaturas mais elevadas que o padrão (clima), a curva de maturação tende a se deslocar para baixo (ver Figura 11) (menor produtividade de sacarose). Neste caso, apesar da queda na estimativa da Pol, a produtividade de colmos (TCH) tende a ser maior, função das condições propícias ao crescimento vegetativo.

Para o cenário B, a data ideal para a colheita estimada pelo modelo ocorreu em 21/9/2011, correspondendo a 77.657 kg ha⁻¹ de biomassa seca de colmos e TPH de 20,82 (Pol de 14,57%). A colheita na data real (30/7/2011) correspondeu, segundo estimativa do modelo, a 74.432 kg ha⁻¹ de biomassa seca de colmos e TPH de 18,00 (Pol de 13,15%).

Tabela 34 – Evolução temporal do acúmulo de biomassa seca de raízes (*BSR*, kg ha⁻¹), folhas (*BSF*, kg ha⁻¹) e colmos (*BSC*, kg ha⁻¹), período útil de industrialização (*PUI*), Pol (*p*, %), produtividade de sacarose com base na biomassa verde dos colmos (potencial - *TPH_p* e deplecionada - *TPH*, t ha⁻¹) e o indicativo da data ideal de colheita, comparada com a real. Valores simulados correspondentes ao último dia de cada mês - cenário B

	BSR	BSF	BSC	p	TPH_p	TPH	Data de colheita	
Cenário B	kg ha⁻¹	kg ha⁻¹	kg ha⁻¹	%	t ha⁻¹	t ha⁻¹	Real	Ideal
Maio	0,05	0,26	0,00	0,00	0,00			
Junho	6,89	7,27	16,98	0,00	0,00			
Julho	129,69	161,18	164,72	0,00	0,00			
Agosto	1322,41	1737,86	1603,28	0,00	0,00			
Setembro	3819,72	5615,73	5573,67	0,00	0,00			
Outubro	5134,71	10337,59	11896,28	0,00	0,00			
Novembro	6205,85	14100,35	19860,95	0,00	0,00			
Dezembro	7125,89	16425,24	28731,35	0,00	0,00			
Janeiro	8128,45	18524,41	37536,52	0,00	0,00			
Fevereiro	8858,50	20212,27	46974,04	0,00	0,00			
Março	9186,76	21156,53	54739,09	2,78	5,08			
Abril	9344,04	21863,07	63287,42	9,69	20,44			
Maio	9367,15	22306,81	71002,31	11,28	26,69			
Junho	9367,15	22405,04	72868,68	12,05	29,26			
Julho	9367,15	22487,33	74432,02	13,15	32,62	18,00*	30	
Agosto	9367,15	22597,87	76532,35	14,32	36,53			
Setembro	9367,15	22657,04	77656,56	14,57	37,73	20,82*		21
Outubro	9367,15	22666,50	77836,38	12,29	31,89			

*Ver Tabela 35

De maneira geral, tem-se que a evolução do acúmulo de biomassa simulado está de acordo com estudos reportados no item 3.1.3, considerando que a fase inicial apresentou crescimento lento, acumulando, em média 10% da biomassa seca total da parte aérea; a fase de crescimento vegetativo acumulou, em média, 83% e a fase final, 7%. Há na Literatura uma grande variação nas informações relativas ao acúmulo de biomassa na fase de maturação. Estudos conduzidos em ambientes com irrigação, por exemplo, apresentam crescimento linear e, portanto, um acúmulo de biomassa seca total (parte aérea) maior nesta fase (10-13%). Como os cenários em questão foram conduzidos em ambientes sem irrigação, e com base na opinião dos técnicos da Usina, uma vez que não houve a execução de experimentos para coleta de dados biométricos de produção, os valores obtidos são bastante condizentes com a realidade.

Quanto ao acúmulo de biomassa seca da parte aérea, Robertson et al. (1996) e Inman-Bamber et al. (2002) observaram que culturas que produziram 60 t ha⁻¹ (PDs) acumularam 80% dessa biomassa no colmo; por outro lado, culturas que obtiveram produtividades inferiores a 50 t ha⁻¹, como os dois cenários em questão (Tabela 35), acumularam 70% da biomassa no colmo. Em estudo da partição de biomassa seca em quatro variedades de cana-de-açúcar cultivadas em Alagoas, Oliveira et al. (2006) reportou que o colmo é responsável por, em média, 78% da biomassa da parte aérea - valores em linha com os estimados pelo modelo (78 e 77% respectivamente para os cenários A e B).

Em relação à produtividade de sacarose, os valores estimados encontram-se de acordo com o estudo da Ridesa (2008), onde a TPH média para o primeiro corte da RB867515 é de, aproximadamente, 21,00, com média de quatro cortes superior a 18,00 TPH. Neste mesmo estudo fica evidente o potencial produtivo da RB867515 (alto teor de sacarose), sendo que, dentre 20 variedades RB's analisadas, este genótipo apresentou estimativa inferior de TPH somente em relação a duas novas variedades cultivadas (RB925268 e RB935744).

A Tabela 35 apresenta um resumo, por cenário, das produtividades potencial, deplecionada e TPH estimadas na data da colheita real e ideal. Observa-se que, no cenário A, a produtividade deplecionada (PDu) estimada pelo modelo foi 141,73 t ha⁻¹, 3,2% a mais que a produtividade real de 137,30 t ha⁻¹. A diferença em TPH entre a data de colheita real e ideal foi de 1,38 t ha⁻¹. Quanto ao cenário B, utilizado como base para a calibração, a produtividade deplecionada (TCH) estimada pelo modelo foi 136,93 t ha⁻¹, 172 kg ha⁻¹ a menos que a produtividade real de 137,10 t ha⁻¹. A diferença em TPH entre as datas de colheita real e ideal foi de 2,82 t ha⁻¹.

Tabela 35 – Produtividades potencial e deplecionada de biomassa de colmos seca e verde (*PPs*, *PDs*, *PPu*, e *PDu*, t ha⁻¹), Pol (*p*, %), produtividade de sacarose (*TPH*, t ha⁻¹), nas datas de colheita real e ideal simuladas para os cenários (A e B) e produtividade real (*Preal*, t ha⁻¹)

	Colheita real		Colheita ideal	
	A	B	A	B
PPs	70,57	74,43	71,81	77,66
PDs	42,52	41,08	43,26	42,86
PPu	235,23	248,11	239,35	258,85
PDu (TCH)	141,73	136,93	144,21	142,86
<i>p</i>	13,87%	13,15%	14,58%	14,57%
TPH	19,65	18,00	21,03	20,82
Preal	137,30	137,10	-	-

Em relação ao cenário A, tem-se, de maneira geral, que a distribuição das chuvas (1301 mm) ao longo do ciclo produtivo foi benéfica ao desenvolvimento da cultura, conforme ilustrado na Figura 16. A radiação solar global média foi de $15.149 \text{ kJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ e a temperatura média de $21,6^\circ\text{C}$.

Figura 16 – Representação da variabilidade temporal da precipitação (P, mm), evapotranspiração potencial (ETp, mm mês⁻¹), evapotranspiração da cultura (ETc, mm mês⁻¹) na safra 2005/2006 (A) e precipitação histórica (P hist, mm)

Com o objetivo de abordar a análise de incertezas no modelo de simulação de crescimento e desenvolvimento da cultura, sob a ótica dos elementos do clima, foram simulados 1000 valores de produtividade potencial (PPu=PP), deplecionada (PDu=PD ou TCH) e TPH, utilizando os valores simulados de temperatura média do ar (T) e radiação solar global (Q_g) obtidos por intermédio das distribuições normal bivariada, denotado (caso 1), gama (caso 2) e Weibull (caso 3).

No histograma de frequências (Figura 17) estão representados, de forma geométrica, o desempenho das variações dos rendimentos (PP e PD) obtidos por meio dos 3 casos. Nota-se que os resultados obtidos de PP e PD foram bastante semelhantes para os casos 1 e 2. Para a PP, caso 1, foram estimados os valores médio, mínimo e máximo de 245,2; 226,3 e 271,0 t ha⁻¹ (mediana de 244,4 t ha⁻¹), enquanto que no caso 2, estes valores foram, respectivamente, 245,9; 222,7 e 279,9 t ha⁻¹ (mediana de 245,3 t ha⁻¹). Já no caso 3, os valores médios estimados de PP foram 24% superiores aos observados nas outras simulações (303,7 t ha⁻¹), com máximo e mínimo de 322,5 e 277,7 t ha⁻¹ (mediana de 303,6 t ha⁻¹).

É importante lembrar que os valores estimados de radiação solar global por intermédio da distribuição Weibull (Tabela 31) foram elevados (em alguns meses mais quentes e

chuvosos e, portanto, de maior crescimento vegetativo, como janeiro e março, as estimativas deste elemento foram, em média, 16% e 15% a mais que a média histórica no período) e, portanto, a magnitude da PP era esperada como sendo superior às demais simulações. Neste tocante, ressalta-se que este modelo tem como princípio a abordagem da eficiência do uso de radiação (EUR), relacionada linearmente com a radiação fotossinteticamente ativa absorvida (RFA) (MONTEITH, 1977) para a produção de biomassa seca total. Sendo assim, a sensibilidade do modelo à RFA_{int} é bastante elevada, fato comprovado por meio de análise de sensibilidade e matriz de similaridade, conforme Lebart et al. (1995), sendo os parâmetros de cultura k e TRC_{IAF} também bastante sensíveis no modelo, porém, em menor intensidade quando comparados à EUR (RUIZ-CORRÊA, 2008).

Os casos 1 e 2 resultaram numa PD média de, respectivamente, 138,5 e 138,2 t ha⁻¹ (medianas de 139,0 e 138,8 t ha⁻¹). Os valores máximos e mínimos também foram bastante próximos, respectivamente, 208,4 e 210,4 t ha⁻¹ e 62,5 e 63,4 t ha⁻¹. A simulação utilizando o caso 3 estimou que a PD foi, em média, 160,3 t ha⁻¹ (mediana de 161,5 t ha⁻¹), com valores mínimo e máximo de 78,3 e 248,7 t ha⁻¹. Esta diferença na relação PD/PP utilizando as estimativas de Qg e T obtidas por meio da distribuição Weibull (caso 3) é função da variabilidade na amplitude dos valores simulados de temperatura média do ar, conforme mencionado no item 5.2 (maior evapotranspiração).

Em relação aos percentis, 90% das estimativas se encontram nos seguintes intervalos: entre 234,6 e 258,4 t ha⁻¹ (PP); e entre 94,2 e 178,4 t ha⁻¹ (PD) (caso 1); entre 233,6 e 260,3 t ha⁻¹ (PP); e entre 94,6 e 180,0 t ha⁻¹ (PD) (caso 2); e entre 293,8 e 313,5 t ha⁻¹ (PP); e entre 104,2 e 215,1 t ha⁻¹ (PD) (caso 3). Quanto a TPH, 90% das estimativas variam entre 13,05 e 24,73 (caso 1); 13,12 e 24,96 (caso 2); e 14,45 e 29,83 (caso 3).

As Figuras 18, 19, 22 e 23 (*box plots*) representam graficamente a distribuição empírica das estimativas de produtividades, posicionando algumas medidas de localização, como a mediana (localização central, Q_2), primeiro (Q_1) e terceiro (Q_3) quartis (entre eles encontram-se 50% das estimativas, ou seja, 75% - 25% dos valores observados). A distância entre esses dois quartis é conhecida como interquartil. Os segmentos verticais acima e abaixo da “caixa” se estendem até os valores extremos observados na amostra, que distam menos que 1,5 da distância interquartil ($Q_3 - Q_1$). Os valores a uma distância maior são representados por asteriscos e denominados valores atípicos (*outliers*), já que se encontram isolados dos valores mais centrais da amostra. Dessa maneira, para o cenário A, 50% das estimativas centrais ($Q_3 - Q_1$) ocorreram nos seguintes intervalos: 240,3 e 249,4 (PP); 121,9 e 157,7 (PD); e 16,9 e

21,9 (TPH) (caso 1); 240,3 e 250,7 (PP); 121,3 e 157,3 (PD); e 16,8 e 21,8 (TPH) (caso 2); e 299,7 e 307,8 (PP); 136,0 e 184,6 (PD); e 18,9 e 25,6 (TPH) (caso 3), em $t\ ha^{-1}$.

Figura 17 – Histograma de frequência absoluta referente ao agrupamento de 1000 simulações de produtividades potencial (PP) e deplecionada (PD) ($t\ ha^{-1}$) simuladas por intermédio das distribuições normal bivariada (NB, caso 1), gama (caso 2) e Weibull (caso 3) para o cenário A

Figura 18 – *Box plot* dos valores das produtividades potencial (*PP*) e deplecionada (*PD*) (t ha^{-1}) simulados por intermédio das distribuições normal bivariada (NB, caso 1), gama (G, caso 2) e Weibull (W, caso 3) (1000 simulações diárias) para o cenário A

Em relação à produtividade de sacarose (TPH), consideradas as datas de colheita real (17/8) e ideal (variação entre 19 e 27/9 – casos 1 e 2; 21/9 e 3/10 – caso 3), o ganho correspondente ao momento dois comparado ao um é, em média, 1,55; 1,54 e 2,76 t ha^{-1} , respectivamente para os casos 1, 2 e 3.

Figura 19 – *Box plot* dos valores da produtividade de sacarose (TPH, t ha^{-1}) no momento da colheita real (1) e na colheita ideal (2), simulados por intermédio das distribuições normal bivariada (NB, caso 1), gama (G, caso 2) e Weibull (W, caso 3) para o cenário A

Quanto à safra 2010/2011 (cenário B), observa-se que, apesar do elevado volume de chuvas reportado durante o ciclo (1589 mm), a distribuição da mesma foi bastante irregular, alternando meses com precipitação abaixo e acima da média histórica (Figura 20), com destaque para a estiagem de maio a novembro de 2010 e excesso de chuvas em janeiro de 2011. A radiação solar global média foi de $16.953 \text{ kJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ - superior ao cenário anterior, fato que pode ser comprovado na estimativa da PP (Tabela 35) e a temperatura média foi de $21,6^{\circ}\text{C}$.

Figura 20 – Representação da variabilidade temporal da precipitação (P, mm), evapotranspiração potencial (ETP, mm mês⁻¹), evapotranspiração da cultura (ETC, mm mês⁻¹) na safra 2010/2011 (B) e precipitação histórica (P hist, mm)

Assim como no cenário anterior, as variações nas produtividades estimadas por meio dos casos 1 e 2 foram muito similares, sendo $244,5$ e $243,5 \text{ t ha}^{-1}$ a média da PP (medianas $244,5$ e $243,4 \text{ t ha}^{-1}$) e $145,0$ e $143,1 \text{ t ha}^{-1}$ a média da PD (medianas $146,1$ e $144,0 \text{ t ha}^{-1}$), respectivamente. As estimativas dos valores mínimo e máximo foram de $229,4$ e $260,3 \text{ t ha}^{-1}$ (PP) e $69,5$ e $211,3 \text{ t ha}^{-1}$ (PD) (caso 1) e $224,7$ e $266,7 \text{ t ha}^{-1}$ (PP) e $69,0$ e $204,8 \text{ t ha}^{-1}$ (PD) (caso 2). O caso 3 resultou nos maiores valores de PP, respectivamente $274,4$; $316,1$ e $297,1 \text{ t ha}^{-1}$ os valores mínimo, máximo e médio estimados (mediana de $297,4 \text{ t ha}^{-1}$); para a PD, os valores foram $70,2$; $242,4$ e $157,9 \text{ t ha}^{-1}$ (mediana de $158,4 \text{ t ha}^{-1}$) (Figura 21).

No tocante aos percentis, tem-se, para o caso 1, que 90% das PP(s) ocorre no intervalo entre $235,4$ e $253,7 \text{ t ha}^{-1}$ e que, neste cenário, apenas 5% dos valores de PD são inferiores a $99,5$ e superiores a $183,3 \text{ t ha}^{-1}$. Para o caso 2, 90% das PP(s) variam no intervalo entre $233,3$ e $254,6 \text{ t ha}^{-1}$ e 5% dos valores de PD são inferiores a $99,2$ e superiores a $182,9 \text{ t ha}^{-1}$. Observou-se, para o caso 3, que 90% das estimativas ocorrem entre $286,4$ e $307,6 \text{ t ha}^{-1}$ (PP) e

entre 102,5 e 213,0 t ha⁻¹ (PD). Quanto à TPH, 90% das estimativas variam entre 13,08 e 24,10 (caso 1); 13,04 e 24,05 (caso 2); e 13,47 e 28,00 (caso 3).

Na Figura 23, o resultado do agrupamento de 1000 simulações de produtividade de sacarose (TPH) realizada pelo intermédio dos três casos, obtidas nas datas de colheita real e ideal (variação entre 18 e 27/9 - casos 1 e 2; 21/9 e 27/9 - caso 3). Neste cenário, observa-se a maior diferença entre as datas de colheita e, portanto, na diferença de estimativas da TPH. Em média (casos 1 e 2), o ganho correspondente ao momento dois comparado ao um é de 2,88 e 2,86 t ha⁻¹, respectivamente. De acordo com resultados do caso 3, a colheita no momento dois representa, em média, 4,08 t a mais de sacarose por hectare.

Em análise das Figuras 22 e 23, tem-se que 50% das estimativas (centrais) ocorreram nos seguintes intervalos: 240,7 e 248,4 (PP), 129,5 e 162,4 (PD) e 17,0 e 21,3 (TPH) (caso 1); 239,2 e 247,7 (PP), 126,3 e 161,5 (PD) e 16,6 e 21,2 (TPH) (caso 2); e 292,7 e 301,6 (PP), 135,0 e 181,7 (PD) e 17,8 e 23,9 (TPH) (caso 3), em t ha⁻¹.

Quanto à natureza da distribuição empírica das produtividades, tanto PP quanto PD, de maneira geral, podem ser representadas como distribuição normal de probabilidade, adotando-se como critérios: (i) quando a média for igual a mediana (pelo menos, aproximadamente) e; (ii) quando o coeficiente de assimetria assumir valores próximo de zero. Nesse sentido, destaca-se que, comparativamente, o cenário A apresentou os maiores valores dos coeficientes de assimetria para a PP (valores inferiores a 0,56, onde a média das estimativas é levemente superior à mediana), do que o cenário B (valores inferiores a 0,19). Já os valores de PD (cenários A e B), apresentaram comportamento similar quanto ao coeficiente de assimetria (valores negativos), sendo a média levemente inferior à mediana. Dentre as simulações, a Weibull obteve os menores coeficientes de assimetria.

Sendo a PP dependente da interação entre a temperatura do ar, fotoperíodo, radiação fotossinteticamente ativa e genótipo, esperava-se, conforme confirmado nos dois cenários, que o grau de dispersão dos valores estimados (amplitude) fosse menor que o apresentado nas estimativas da PD (função da variabilidade das chuvas e, por conseguinte, na evapotranspiração e armazenamento de água no solo).

A partir de uma calibração adequada do modelo (procedimento determinístico), a abordagem estocástica, como a aqui sugerida, pode ser de grande valia como “ferramenta de auxílio”, por exemplo, no mapeamento de AP(s), com base na variação temporal do rendimento (PP e PD), ou no estudo do desempenho de novos genótipos em função de diferentes condições climáticas, fato que, na prática, levariam anos para se obter esta

informação (principalmente quando considerado apenas o ciclo da cana planta). Não obstante, análises envolvendo o desempenho da cultura em resposta às variações climáticas, como as sugeridas pelo IPCC (2007), bem como estudos que envolvam a favorabilidade climática à ocorrência de doenças, também podem ser abordados por meio de modelos estocásticos.

Figura 21 – Histograma de frequência absoluta referente ao agrupamento de 1000 simulações de produtividades potencial (*PP*) e deplecionada (*PD*) ($t\ ha^{-1}$) simuladas por intermédio das distribuições normal bivariada (NB, caso 1), gama (caso 2) e Weibull (caso 3) para o cenário B

Simulações têm hoje um papel importante na inferência estatística, sendo uma de suas principais utilidades a de investigar as propriedades de um estimador. Se a distribuição de um estimador (parâmetro) não é conhecida, a geração de um número grande de amostras a partir da distribuição dos dados originais, e o cálculo do valor deste estimador para cada uma das amostras geradas, fornecerão uma boa idéia da distribuição desse estimador (valor médio e variabilidade) (MENDES, 2004).

Figura 22 – *Box plot* dos valores das produtividades potencial (PP) e deplecionada (PD) ($t\ ha^{-1}$) simulados por intermédio das distribuições normal bivariada (NB, caso 1), gama (G, caso 2) e Weibull (W, caso 3) (1000 simulações diárias) para o cenário B

Figura 23 – *Box plot* dos valores da produtividade de sacarose (TPH , $t\ ha^{-1}$) no momento da colheita real (1) e na colheita ideal (2), simulados por intermédio das distribuições normal bivariada (NB, caso 1), gama (G, caso 2) e Weibull (W, caso 3) para o cenário B

5.4 Considerações finais

No que diz respeito aos modelos de simulação de crescimento e desenvolvimento de culturas, há de se considerar que não existe o modelo “certo” ou “errado” e sim o mais, ou menos, adequado ao fim proposto. A escolha da metodologia a ser utilizada depende, sobremaneira, da escala de aplicação e da disponibilidade de informações relativas à cultura e ao ambiente de produção (estado momentâneo do clima e solo).

Na modelagem do crescimento e desenvolvimento de cana-de-açúcar, o método da soma térmica relaciona-se adequadamente à ordem de magnitude do tempo em que a cultura permanece à campo, bem como no momento indicativo de mudança nos estádios fenológicos; contudo, como visto nas Tabelas 33 e 34, o mesmo é ineficaz para a predição do momento ideal de colheita, estando este relacionado à curva de maturação da variedade cultivada, dentre outros fatores pertinentes ao sistema operacional de uma Usina.

Apesar de bastante utilizado, a soma térmica está sujeita a críticas (XUE et al., 2004), entre elas, a de que existem vários métodos de cálculo (SANGOI; SILVA, 1986), o que pode ser uma limitação para comparar a soma térmica de fases de desenvolvimento das variedades cultivadas em diferentes trabalhos. Outro ponto a se ressaltar é a divergência quanto à nomenclatura utilizada para designar estádios fenológicos distintos; por exemplo, a emergência refere-se ao “momento” em que o broto (agora chamado de colmo primário) efetivamente emerge acima do solo; já a brotação refere-se ao “processo” em que as gemas localizadas na base do colmo primário se entumescem, originando novos brotos que se dirigem à superfície do solo. Neste trabalho, considerou-se a “emergência”, com base nas informações coletadas pela empresa. Outra fonte de crítica é com relação às temperaturas cardinais (basal inferior, superior e ótima), geralmente consideradas constantes ao longo do ciclo da cultura o que, muitas vezes, não é uma pressuposição adequada (STEINMETZ et al., 2004; PAULA et al., 2005), sendo encontrado, em Literatura, grandes divergências nestes valores.

Em relação ao balanço hídrico, faz-se necessário ressaltar que o método adotado para estimar a evapotranspiração de referência (THORNTHWAITE, 1948) baseia-se apenas na temperatura média do ar, sendo esta sua principal vantagem. Este método foi desenvolvido para condições de clima úmido e, por isso, normalmente apresenta “subestimativa da evapotranspiração de referência” em condições de clima seco. Apesar dessa limitação, é um método bastante empregado para fins climatológicos e, quando o objetivo do modelo é uma

aplicação em escalas maiores, quando muitas vezes não dispomos de informações detalhadas sobre o local, este método é bastante indicado.

Como o modelo tratou da simulação do crescimento (acúmulo de biomassa) e desenvolvimento (diferenciação celular e padrão de formação) da cultura em ambientes de produção (AP) distintos, e no julgamento do AP deve-se levar em conta a interação solo-clima-planta e especificidade do local, o correto seria que o modelo levasse em consideração, também, os parâmetros de solo. Contudo, tais informações não foram disponibilizadas, bem como os dados reais da Pol – daí a necessidade de utilizar a curva “média” para a variedade cultivada RB857515.

Ressalta-se, porém, que o modelo apresentado é passível de adaptações e introdução de novos procedimentos, como a introdução de componentes que levem em conta o “solo” ou outros fatores que interferem no planejamento do plantio e colheita, como por exemplo, a distância das áreas até a Usina; caminhões para transporte; capacidade de moagem, carregamento e transporte; preço mensal do açúcar e álcool; custos fixos e variáveis industriais e agrícolas.

Nesse tocante, é fundamental incentivar a formação de “massa crítica” em nosso país que seja capaz de desenvolver modelos flexíveis quanto a forma de cálculo, inserção/exclusão de componentes e adaptados às nossas necessidades, além de poderem ser difundidos livremente a um maior número de usuários (difusão de conhecimento).

Diante das imprecisões a que estão sujeitos os resultados obtidos a partir da calibração de modelos, há a necessidade de implementar métodos que permitam a avaliação das incertezas, quer seja nos parâmetros de cultura ou nas variáveis de entrada do modelo, como abordado neste trabalho. A curva de maturação ou a eficiência do uso de radiação (*EUR*), por exemplo, podem ser abordadas de forma estocástica.

No primeiro caso, há de se levar em conta que a curva de maturação varia (considerando o mesmo genótipo), em função das condições momentâneas do tempo e AP. Quanto a *EUR*, dada a grande sensibilidade do modelo a este parâmetro, sugere-se que, em estudos futuros, o mesmo seja abordado com base na distribuição triangular, usada quando é possível se determinar o valor mais provável da variável aleatória, além de seu valor mínimo e máximo. No caso, a *EUR* poderia assumir valores entre 3,0 e 4,0 g MJ⁻¹, com base na RFA interceptada, conforme literatura (item 5.3.2), o que, exemplificando, mudaria as estimativas de PP da seguinte maneira:

Tabela 36 - Percentis (P_5 e P_{95}) referentes à simulação de produtividade potencial (PPu , $t\ ha^{-1}$), com base na alteração da eficiência do uso da radiação (EUR , $g\ MJ^{-1}$) realizada por intermédio da simulação normal bivariada - 100 simulações

EUR	Cenário A		Cenário B	
	P_5	P_{95}	P_5	P_{95}
4	246,253	- 274,958	246,481	- 262,671
3,9	240,380	- 268,405	240,593	- 256,394
3,8	234,505	- 261,849	234,704	- 250,117
3,7	228,628	- 255,290	228,815	- 243,840
3,6	222,749	- 248,728	222,926	- 237,562
3,5	216,870	- 242,165	217,036	- 231,286
3,4	210,990	- 235,600	211,147	- 225,009
3,3	205,107	- 229,035	205,259	- 218,733
3,2	199,224	- 222,468	199,370	- 212,457
3,1	193,341	- 215,902	193,482	- 206,182
3	187,457	- 209,335	187,594	- 199,907

Quanto à simulação da precipitação, apesar de não terem sido realizados mais testes para verificar a precisão e a exatidão dos valores simulados de chuva em relação aos valores observados, de maneira geral, tem-se que a simulação gama representa adequadamente a precipitação em uma região. Contudo, apesar dos “truncamentos”, notou-se grande variabilidade nos valores da série, o que pode ter superestimado as produtividades deplecionada (assimetria positiva - Figura 15 B), além da distribuição temporal da mesma. Salienta-se que a abordagem que apresenta o melhor desempenho é aquela que leva em consideração a hipótese de persistência dos dados de chuva, descrita por Markov, na qual os dados de precipitação do dia presente apresentam uma tendência de repetir o evento ocorrido no dia anterior (Cadeias de Markov).

No presente trabalho levou-se em consideração o ciclo da cana planta, sendo aconselhável, também, trabalhos similares que levem em conta o ciclo de cana soca, além de contemplarem os demais cultivos (cana de ano e cana de inverno).

A técnica da modelagem deve ser utilizada para definir as prioridades da pesquisa, como por exemplo, a estimativa da EUR e o acúmulo de biomassa após a maturação, auxiliando, dessa maneira, nos rumos da experimentação convencional, fazendo com que os recursos sejam melhores alocados e a qualidade das informações seja mais relevantes à pesquisa.

Sugere-se, por fim, que estudos futuros sejam conduzidos com o intuito de “calibrar” o modelo proposto - o que não foi o objetivo principal deste trabalho - tanto com base em condições ótimas para desenvolvimento (PP), quanto em situações envolvendo limitações hídricas e de nutrientes (PD), utilizando dados biométricos de produção (biomassa e açúcar) para o genótipo de interesse em diferentes ambientes de produção.

6 CONCLUSÕES

Teste de aderência:

- Para a variável temperatura média do ar, as três distribuições apresentaram aderência satisfatória aos dados diários, com melhor desempenho da distribuição normal (99,45%), seguida pela distribuição Weibull (98,63%) e gama (97,53%), portanto, todas são adequadas para representar o padrão de ocorrência desta variável em Piracicaba, SP.
- Para a variável radiação solar global, as distribuições que obtiveram melhor desempenho quanto aos ajustes aos dados diários da série histórica foi a normal (99,73%) e a gama (92,60%). A distribuição Weibull não apresentou ajuste satisfatório aos dados diários de radiação solar global, em escala diária, em Piracicaba, SP.

Simulações:

- As distribuições normal bivariada e gama mostraram excelente desempenho no processo de simulação da temperatura média do ar e radiação solar global diária, avaliados por diferentes metodologias (ER (diário), análise de Regressão, índices de precisão e exatidão e teste *t*). A distribuição Weibull não é indicada para representar o padrão da radiação solar global em Piracicaba, em escala diária.
- A distribuição gama é uma excelente alternativa para a estimativa da precipitação (que deve ser realizada juntamente com as cadeias de Markov), e também pode ser utilizada para a simulação dos elementos temperatura média do ar e radiação solar - quando tratados individualmente.
- A simulação utilizando a distribuição normal bivariada destaca-se por poder representar padrões climáticos cujos valores possam assumir sinal negativo, como na simulação de temperaturas em regiões amenas. Todavia, esta simulação leva em consideração o “princípio físico” de que o elemento radiação solar global desencadeia a temperatura, sendo importante fundamento para uso em modelos de crescimento e desenvolvimento de culturas.

Modelo proposto - abordagens determinística e estocástica:

- Por intermédio de abordagem determinística e com base na curva de maturação da variedade de interesse (RB867515), para dois ambientes de produção (cenários), o modelo proposto estabeleceu adequadamente: (i) a evolução temporal do acúmulo de biomassa seca de raízes,

folhas e colmos, correspondente à estimativa da produtividade potencial (PP); (ii) a estimativa da produtividade deplecionada (PD) por água (e nutrientes) em função da PP de colmos e balanço hídrico; (iii) o período útil de industrialização (7 de julho até 31 de outubro), em função do valor da Pol crítico (12,257%); (iv) Pol; (v) produtividade de sacarose (TPH) e; (vi) a data ideal de colheita que maximiza a Pol e biomassa de colmos.

- Por intermédio das simulações utilizando as distribuições normal bivariada e gama observou-se que, nos dois cenários, a variação no rendimento (PP, PD e TPH), ocorreu de forma semelhante, no que se refere a magnitude de valores.

- Para a simulação utilizando a distribuição Weibull verificou-se, em função dos elevados valores simulados de radiação solar global, que as estimativas de produtividade potencial (PP) foram sempre maiores que nas demais simulações. Em contrapartida, em função da variação na amplitude dos valores de temperatura simulados, a relação PD/PP foi sempre menor nesta simulação.

- Ao considerar os componentes de incerteza presentes nos elementos do clima, a interpretação dos resultados passa a ser realizada de forma mais abrangente, pois estes passam a ser expressos em termos de frequência de ocorrência e não como simples valores únicos ou determinísticos.

REFERÊNCIAS

- ABRAMOWITZ, M.; STEGUN, I.A. **Handbook of mathematical functions with formulas, graphs, and mathematical tables**. New York: Gamma and Related Functions, 1972. 987 p.
- ACOCK, B.; ACOCK, M. Potential for using long-term field research data to develop and validate crop simulators. **Agronomy Journal**, Madison, v. 83, n. 1, p. 56-61, 1991.
- AHRENS, J.H.; DIETER, U. Computer methods for sampling from gamma, beta, Poisson and binomial distributions. **Computing**, Washington, v. 12, n. 3, p. 223-246, 1974.
- _____. Generating gamma variates by a modified rejection technique. **Communications of the ACM**, New York, v. 25, n. 1, p. 47-54, 1982.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Roma: FAO, 1998. 331 p. (Paper, 56).
- ALMEIDA, A.C.S.; SOUZA, J.L.; TEODORO, I.; BARBOSA, G.V.S.; MOURA FILHO, G.; FERREIRA JÚNIOR, R.A. Desenvolvimento vegetativo e produção de variedades de cana-de-açúcar em relação à disponibilidade hídrica e unidades térmicas. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 5, p. 1441-1448, 2008.
- ARAÚJO, W.F.; COSTA, S.A.A.; SANTOS, A.E. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET₀) para Boa Vista, Roraima. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 20, n. 4, p. 84-88, 2007.
- ARAÚJO, M.I.M. **Zoneamento da produtividade potencial climática da cana-de-açúcar no Estado do Rio de Janeiro**. 1993. 84 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1993.
- ARGENTON, P.E. **Influência das variáveis edafoclimáticas e de manejo no rendimento de variedades de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*), na região de Piracicaba**. 2006. 109 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.
- ASSIS, J.P.; DOURADO NETO, D.; MANFRON, P.A.; MARTIN, T.N.; SPAROVEK, G.; TIMM, L.C. Ajustes de séries históricas de temperatura e radiação solar global diária às funções de densidade de probabilidade normal e log normal em Piracicaba, SP. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 12, n. 1, p. 113-121, 2004.
- ASSIS, J.P.; DOURADO NETO, D.; REICHARDT, K.; MANFRON, P.; MARTIN, T.N.; BONNECARRÈRE, R.A.G. Dados climáticos simulados e produtividade potencial do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 5, p. 731-737, 2006.
- ASSIS, F.N. **Modelagem da ocorrência da quantidade de chuva e de dias secos em Piracicaba-SP e Pelotas - RS**. 1991. 134 p. (Doutorado em Física do Ambiente Agrícola) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1991.
- _____. Ajuste da função gama aos totais semanais de chuva de Pelotas – RS. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 1, n. 1, p. 131-136, 1993.

AZEVEDO, H.J. **Fisiologia da cana-de-açúcar**. Araras: Programa Nacional de Melhoramento da Cana-de-Açúcar, 1981. 108 p.

AZEVEDO, H.M. **Resposta da cana-de-açúcar a níveis de irrigação e de adubação de cobertura nos tabuleiros da Paraíba**. 2002. 112 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2002.

BARBIERI, V. **Condicionamento climático da produtividade potencial da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*): um modelo matemático-fisiológico de estimativa**. 1993. 142 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1993.

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

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 AGORMETEOROLOGIA, 1., 1979. Mossoró. **Anais...**Mossoró: SBA, 1979. p. 6-8.

BEAUCLAIR, E.G.F. de. Planejamento e estimativa na produção de cana. **Visão Agrícola**, Piracicaba, v. 1, p. 24-27, 2004.

BERNARDES, M.S. Fotossíntese no dossel das plantas cultivadas. In: CASTRO, P.R.C. **Ecofisiologia da produção agrícola**. Piracicaba: POTAFOS, 1987. p. 13-48.

BEZUIDENHOUT, C.N. **A model review and proposed mechanistic tiller model for the CANEGRO sugarcane crop model**. 2000. 78p. Thesis M.Tech. - Technikon Natal, Durban.

BLAIN, G.C.; KAYANO, M.T.; CAMARGO, M.B.P. de; LULU, J. Variabilidade amostral das séries mensais de precipitação pluvial em duas regiões do Brasil: Pelotas-RS e Campinas-SP. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 24, n. 1, p. 1-11, 2009.

BLAIN, G.C.; PIEDADE, S.M.S.; CAMARGO, M.B.P.; GIAROLA, A. Distribuição temporal da precipitação pluvial mensal observada no posto meteorológico do Instituto Agrônomo, em Campinas, SP. **Bragantia**, Campinas, v. 66, n. 2, p. 347-355, 2007.

BOONS-PRINS, E.R.; KONING DE, G.H.J.; VAN DIEPEN, C.A.; PENNING DE VRIES, F.W.T. **Crop-specific parameters for yield forecasting across the European Community: simulation reports**. Wageningen: CABBO-TT, 1993. 43 p. (CABO-TT, 32).

BOOTE, K.J.; JONES, J.W.; PICKERING, N.B. Potential uses and limitations of crop models. **Agronomy Journal**, Madison, v. 88, n. 5, p. 704-716, 1996.

BOTELHO, V.A.; MORAIS, A.R. Estimativas dos parâmetros da distribuição gama de dados pluviométricos do município de Lavras, Estado de Minas Gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 23, n. 3, p. 697-706, 1999.

BOUMAN, B.A.M.; VAN KEULEN, H.; VAN LAAR, H.H.; RABBINGE, R. The 'School of de Wit' crop growth simulation models: a pedigree and historical overview. **Agricultural Systems**, Amsterdam, v. 52, n. 2/3, p. 171-198, 1996.

BUCHANAN, B.B.; GRUISSEM, W.; JONES, R. L. **Biochemistry and molecular biology of plants**. Rockville, MD, American Society of Plant Biologists, 2000. 1408 p.

BULL, T.A.; TOVEY, D.A. Aspects of modeling sugarcane growth by computer simulation. In: INTERNATIONAL SOCIETY SUGARCANE TECHNOLOGISTS, 15., 1974, Durban. **Proceedings...** Durban: ISSCT, 1974. p. 1021-1032.

BURIOL, G.A.; HELDWEIN, A.B.; ESTEFANEL, V.; MATZENAUER, R.; MARCON, I.A. Probabilidade de ocorrência de valores de radiação solar prejudiciais ao cultivo do pepineiro na região do baixo Vale do Taquari, RS. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, v. 7, n. 1, p. 97-104, 2001.

BYRD, R.H.; LU, P.; NOCEDAL, J.; ZHU, C. A limited memory algorithm for bound constrained optimization. **SIAM Journal on Scientific Computing**, Canada, n. 16, p. 1190-1208, 1995.

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

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

CAMPOS, H. **Estatística não paramétrica**. 4. ed. Piracicaba: ESALQ, 1983. 349 p.

CARGNELUTTI FILHO, R.; MATZENAUER, R.; TRINDADE, J.K.; Ajustes de funções de distribuição de probabilidade à radiação solar global no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 12, p. 1157-1166, 2004.

CARVALHO, L.G. **Eficiência da produção agrícola de cana-de-açúcar no estado de São Paulo entre as safras 1990/1991 e 2005/2006**. 2009. 118 p. Dissertação (Mestrado em Física do Ambiente Agrícola) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

CASAGRANDE, A.A. **Tópicos de morfologia e fisiologia da cana-de-açúcar**. Jaboticabal: FUNEP, 1991. 157 p.

CASTELLVÍ, F.M.; MORMENEO, I.; PEREZ, P. J. Generation of daily amounts of precipitation from standard climatic data: a case study for Argentina. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 289, n. 1/4, p. 286-302, 2004.

CASTRO, P. R.C. Maturadores químicos em cana-de-açúcar. In: SEMANA DA CANA-DE-AÇÚCAR DE PIRACICABA, 4., 1999, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: SACCHARUM, 1999. v. 1, p. 12-16.

CASTRO, P.R.C.; CHRISTOFFOLETI, P.J. Fisiologia da cana-de-açúcar. In: MENDONÇA, A.F. **Cigarrinhas da cana-de-açúcar: controle biológico**. Maceió: Insecta, 2005. p. 3-48.

CASTRO, P.R.C.; KLUGE, R.A.; SESTARI, I. **Manual de fisiologia vegetal: fisiologia de cultivos**. São Paulo: Ceres, 2008. 864 p.

CATALUNHA, M.J.; SEDIYAMA, G.C.; LEAL, B.G.; SOARES, C.P.B.; RIBEIRO, A. Aplicação de cinco funções densidade de probabilidade a séries de precipitação pluvial no Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 10, n. 1, p. 153-162, 2002.

CENTRO DE PESQUISAS METEOROLÓGICAS E CLIMÁTICAS APLICADAS A AGRICULTURA. **Clima dos municípios paulistas**. Disponível em: <http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_436.html>. Acesso em: 05 mar. 2012.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar safra 2011/2012 Terceiro Levantamento**: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/11_12_08_11_00_54_08.pdf>. Acesso em: 05 mar. 2012.

CONSELHO DOS PRODUTORES DE CANA-DE-AÇÚCAR, AÇÚCAR E ÁLCOOL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Regulamento dos negócios de compra e venda de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo**: manual de instruções. Piracicaba, 1998. 16 p.

_____. **Manual de instruções**. Piracicaba, 2006. 112 p.

CORRÊA, S.T.R. **Adaptação do modelo LINTUL (Light Interception and Utilization) para estimação da produtividade potencial da cultura de soja**. 2008. 106p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

DALE, R.F. **Applied climatology**. West Lafayette: Indiana: Purdue University, 1968. 125 p.

DANTAS, C.A.B. **Probabilidade: um curso introdutório**. 3. ed. São Paulo: EDUSP, 2008. 145p.

DEUBER, R. Maturação da cana-de-açúcar na região sudeste do Brasil. In: SEMINÁRIO DE TECNOLOGIA DA COPERSUCAR, 1988, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: COPERSUCAR, 1988. p. 33-40.

DEMATTE, J.L.I.; DEMATTE, J.A.M. Ambientes de produção como estratégia de manejo na cultura da cana-de-açúcar. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 127, p. 1-18, 2009.

DEMETRIO, P. A.; ZONETTI, P. C.; MUNHOZ, R. E. F. Avaliação de clones de cana-de-açúcar promissores RB's quanto à resistência à broca-da-cana (*Diatraea saccharalis*) na região noroeste do Paraná. **Iniciação Científica CESUMAR**, Maringá, v. 10, n. 1, p. 13-16, 2008.

DIAS, F.L.F.; MAZZA, J.A.; MATSUOKA, S.; PERECIN, D.; MAULE, R.F. Produtividade da cana-de-açúcar em relação ao clima e solos da região noroeste do Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 23, n. 3, p. 627-634, 1999.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979. 193 p. (FAO Irrigation and drainage, 33).

_____. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Trad. de H.R. Gheyi et al. Campina Grande: FAO, 1994. 306 p. (Irrigação e Drenagem, 33).

DOURADO NETO, D.; ASSIS, J.P. de; MANFRON, P.A.; SPAROVEK, G.; BARRETO, A.G.O.P.; MARTIN, T.N. Simulação estocástica de valores médios diários de temperatura do ar e de radiação solar global para Piracicaba-SP, utilizando distribuição normal. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 13, n. 2, p. 225-235, 2005a.

DOURADO NETO, D.; ASSIS, J.P.; TIMM, L.C.; MANFRON, P.A.; SPAROVEK, G. MARTIN, T.N. Ajustes de modelos de distribuição de probabilidade a séries históricas de precipitação pluvial diária em Piracicaba, SP. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 13, n. 2, p. 273-283, 2005b.

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.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, 1999. 412 p.

ESTEFANEL, V.; BURIOL, G.A.; ANDRIOLO, J.L.; LIMA, C.P. Disponibilidade de Radiação solar nos meses de inverno para o cultivo do tomateiro em estufa na região de Santa Maria, RS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 10., 1997, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba, 1997. p. 10-12.

FARIAS, C.H.A.; FERNANDES, P.D.; DANTAS NETO, J.Y.; GHEYI, H.R. Eficiência no uso da água na cana-de-açúcar sob diferentes lâminas de irrigação e níveis de zinco no litoral paraibano. **Engenharia Agrícola**, Botucatu, v. 28, n. 3, p. 494-506, 2008.

FERNANDES, A.C.; BENDA, G.T.A. Distribution patterns of Brix and fiber in the primary stalk of sugar cane. **Sugar Cane**, Port Talbot, v. 5, p. 8-13, 1985.

FISHER, R.A. **Statistical methods for research workers**. 8th ed. London: Oliver and Boyd, 1941. 344 p.

FLOSS, E. L. **Fisiologia das plantas cultivadas**. Passo Fundo: UPF, 2004. 536 p.

FONTANA, D.C.; BERLATO, M.A.; LAUSCHNER, M.H.; MELLO, R.W de. Modelo de estimativa de rendimento de soja no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 3, p. 399-403, 2001.

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

GENZ, A. Numerical computation of multivariate normal probabilities. **Journal of Computational and Graphical Statistics**, Alexandria, v. 1, p. 141-150, 1992.

GHELLER, A.C.A. Resultados da aplicação de maturadores vegetais em cana-de-açúcar, variedades RB72454 e RB835486 na região de Araras, SP. In: JORNADA CIENTÍFICA DA UFSCar, 4., 2001, São Carlos. **Resumos...** São Carlos: UFSCar, 2001.

- GOMES, F.P.; GARCIA, C.H. **Estatística aplicada a experimentos agronômicos e florestais**: exposição com exemplos e orientações para uso de aplicativos. Piracicaba: FEALQ, 2002. 309 p.
- GOUDRIAAN, J.; van LAAR, H.H. **Modeling potential crop growth processes**: textbook with exercises. Dordrecht: Kluwer Academic Press., 1994. 238 p.
- 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.
- HATCH, M.D.; SLACK, C.R. Photosynthesis by sugar-cane leaves: a new carboxylation reaction and the pathway of sugar formation. **Biochemistry Journal**, Great Britain, v. 101, p. 103-111, 1966.
- HIROSE, T. Development of the Monsi-Saeki theory on canopy structure and function. **Annals of Botany**, Oxford, v. 95, p. 483-494, 2005.
- HOEL, P.G. **Estatística elementar**. São Paulo: Editora Fundo de Cultura, 1968. 311 p.
- HOFFMANN, A.; NACHTIGAL, J.C.; ROSSAL, P.A.L.; ASSIS, F.N. Estimativa da primeira data do outono e ultima data da primavera com temperatura do ar menor ou igual a 0°C em Pelotas-RS. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 2, p. 65-68, 1994.
- HOFFMANN, H.P.; SANTOS, E.G.D.; BASSINELLO, A.I.; VIEIRA, M.A.S. **Variedades RB de cana-de-Açúcar**. Araras: UFSCar, CCA, 2008. 30 p.
- HOGG, R.V.; CRAIG, A.T. **Introduction to mathematical statistics**. 4th ed. New York: Macmillan, 1978. 438 p.
- INMAN-BAMBER, N.G. A growth model for sugar-cane based on a simple carbon balance and the CERES-Maize water balance. **South African Journal Plant Soil**, Bethlehem, v. 8, n. 2, p. 93-99, 1991.
- _____. CANEGRO: its history, conceptual basis, present and future uses. In: ROBERTSON, M.J. (Ed.). **Research and modeling approaches to assess sugarcane production opportunities and constraints**. St. Lucia: University of Queensland, 1995. p. 31-34.
- _____. Temperature and seasonal effects on canopy development and light interception of sugarcane. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 36, n. 1, p. 41-51, 1994.
- _____. Sugarcane water stress criteria for irrigation and drying-off. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 89, n. 1, p. 107-122, 2004.
- INMAN-BAMBER, N.G.; MUCHOW, R.C.; ROBERTSON, M.J. Dry matter partitioning of sugarcane in Australia and South Africa. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 76, p. 71-84, 2002.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate change 2007: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers. Working Group I. <http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/Report/AR4WG1_Pub_SPM-v2.pdf>. Acesso em: 11 out 2012.

JENSEN, M.E. **Water consumptions by agricultural plant growth**. New York: Academic Press, 1968. v. 2.

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

JONES, J.W.; BOOTE, K.J.; JAGTAP, S.S.; WILKERSON, G.G.; HOOGENBOOM, G.; MISHOE, J.W. **SOYGRO V5.4-Technical documentation**. Gainesville: University of Florida, Agricultural Engineering Department and Agronomy Department, 1987. 170 p.

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

KIM, S.H.; GITZ, D.C.; SICHER, R.C.; BAKER, J.T.; TIMLIN, D.J.; REDDY, V.R. Temperature dependence of growth, development, and photosynthesis in maize under elevated CO₂. **Environmental and Experimental Botany**, Amsterdam, v. 61, n. 3, p. 224-236, 2007.

KIRINY, J.R.; JONES, C.A.; O'TOOLE, J.C.; BLANCHET, R.; CABELGUENNE, M.; SPANEL, D.A. Radiation-use efficiency in biomass accumulation prior to grain-filling for five grain-crop species. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 20, p. 51-64, 1989.

KLAR, A.E. **Irrigação**: frequência e quantidade de aplicação. São Paulo: Nobel, 1992. 156 p.

KOSGEI, J.R.; JEWITT, G.P.W.; KONGO, V.M.; LORENTZ, S.A. The influence of tillage on field scale water fluxes and maize yields in semi-arid environments: A case study of Potshini catchment, South Africa. **Physics and Chemistry of the Earth**, Oxford, v. 32, p. 1117-1126, 2007.

KROPFF, M.J.; MATTEWS, R.B.; van LAAR, H.H.; ten BERGE, H.F.M. The rice model Oryza1 and its testing. In: MATTHEWS, R.B.; KRPFF, M.J.; BACHELET, D.; van LAAR, H.H. (Ed.) **Modeling the impact of climate change on rice production in Asia**. Manila: International Rice Research Institute, 1995. p. 27-50.

KUBINS, S. Measurement of radiant energy. In: SESTAK, Z.; CATSKY, J.; JARVIS, P.G. **Plant photosynthetic production, manual of methods**. Hague: W. Junk, 1971. p. 702-765.

LAPPONI, J.C. **Estatística usando Excel**. São Paulo: Lapponi Treinamento, 1997. 401 p.

LEBART, L.; MORINEAU, A.; PIRON, M. **Statistique Exploratoire Multidimensionnelle**. Ed. Dunod, 1995, Paris, 438 p.

LEEGOOD, R.C. C₄ photosynthesis: principles of CO₂ concentration and prospects for its introduction into C₃ plants. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 53, n. 369, p. 581-590, 2002.

- LEME, E.J.A.; MANIERO, M.A.; GUIDOLIN, J.C. Estimativa da área foliar da cana-de-açúcar e sua relação com a produtividade. **Cadernos PLANALSUCAR**, Piracicaba, n. 2, p. 3-9, 1984.
- 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.
- LIU, D.L.; KINGSTON, G.; BULL, T.A. A new technique for determining the thermal parameters of phenological development in sugarcane, including suboptimum and supraoptimum temperatures regimes. **Agricultural and Forest Meteorology**, Oxford, v. 90, p. 119-139, 1998.
- LOVENSTEIN, H.; LANTINGA, E.A.; RABBINGE, R.; VAN KEULEN, H. **Principles of production ecology**. Wageningen: Syllabus of Chair Group - Theoretical Production Ecology, 1995. 121 p.
- LUSTOSA, P.R.B.; PONTE, V.M.R.; DOMINAS, W.R. Simulação. In: CORRAR, L.J.; THEÓPHILO, C.R. (Coord.). **Pesquisa operacional para decisão em contabilidade e administração: contabilometria**. São Paulo: Atlas, 2004. p. 242-284.
- MACHADO, E.C. **Um modelo matemático-fisiológico para simular o acúmulo de material seca na cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*)**. 1981. 115 p. Dissertação (Mestrado em Biologia Vegetal) - Instituto de Biologia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1981.
- _____. Fisiologia da produção da cana-de-açúcar: crescimento. In: PARANHOS, S.B. **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. v. 1, p. 56-87.
- MACHADO, E.C.; PEREIRA, A.R.; CAMARGO, M.B.P.; FAHL, J.I. Relações radiométricas de uma cultura de cana-de-açúcar. **Bragantia**, Campinas, v. 44, n. 1, p. 229-238, 1985.
- MACHADO, E.C.; PEREIRA, A.R.; FAHL, J.I.; ARRUDA, J.V.; CIONE, J. Índices biométricos de duas variedades de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 17, n. 9, p. 1323-1329, 1982.
- MAGALHÃES, M.N.; LIMA, A.C.P. de. **Noções de probabilidade e estatística**. 7. ed. São Paulo: EDUSP, 2010. 408 p.
- MARIN, F.R.; SENTELHAS, P.C.; UNGARO, M. R. G. Perda de rendimento potencial da cultura do girassol por deficiência hídrica, no Estado de São Paulo. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 57, n. 1, p. 1-6, 2000.
- MARIN, F.R.; PELLEGRINO, G.Q.; ASSAD, E. D.; PINTO, H.S.; ZULLO JUNIOR, F. Cana-de-açúcar. In: MONTEIRO, J.E.B.A (Ed) **Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola**. Brasília: INMET, 2009, p.111-130.
- MAROCCO, J.P.; KU, M.S.B.; LEA, P.J.; DEVER, L.V.; LEEGOOD, R.C.; FURBANK, R.T.; EDWARDS, G.E. Oxygen requirement and inhibition of C₄ photosynthesis: An analysis of C₄ plants deficient in the C₃ and C₄ cycles. **Plant Physiology**, Lancaster, v. 116, p. 823-832, 1998.

MARQUES JÚNIOR, S.; PAZ, V.P.S.; COSTA, R.N.T.; FRIZZONE, J.A. Modelo computacional para estimativa das precipitações mensais prováveis utilizando a distribuição gama incompleta. **Revista Engenharia Rural**, Piracicaba, v. 5, n. 1, p. 20-33, 1994.

MARQUES, T.A.; SILVA, W.H. Crescimento e maturação em três cultivares de cana-de-açúcar. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, Paraíba, v. 8, p. 54-60, 2008.

MARTIN, T.N. **Modelo estocástico para estimação da produtividade de soja no Estado de São Paulo utilizando simulação normal bivariada**. 2007. 209 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

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. 130 p. Thèse (Docteur) – Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris, 2003

MAULE, R.F.; MAZZA, J.A.; MARTHA JR., 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.

MEINKE, H.; HOCHMAN, Z. Using seasonal climate forecasts to manage dryland crops in northern Australia. In: HAMMER, G.L.; NICHOLLS, N.; MITCHELL, C. (Ed.). **Application of seasonal climate forecasting in agricultural and natural ecosystems: the Australian experience**. Amsterdam: Kluwer Academic, 2000. p. 149–165.

MENDES, B. V. M. **Introdução à análise de eventos extremos**. Rio de Janeiro: EPapers serviços editoriais, 2004. 232p.

MEYER, P.L. **Probabilidade: aplicações à estatística**. Rio de Janeiro: LCT, 1974. 391 p.

MIOCQUE, J. Avaliação de crescimento e de produtividade de matéria verde da cana-de-açúcar na região de Araraquara-SP. **STAB - Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 17, n. 4, p. 45-47, 1999.

MONTEITH, J.L. Climate and the efficiency of crop production in Britain. **Transaction Royal Society of London Botany**, London, v. 281, p. 277-294, 1977.

_____. Validity of the correlation between intercepted radiation and biomass. **Agricultural and Forestry Meteorology**, Amsterdam, v. 68, p. 220-231, 1994.

MORETTIN, P.A.; BUSSAB, W.O. **Estatística básica**. 5. ed. São Paulo: Saraiva, 2003. 526 p.

MORRISON, D.F. **Multivariate statistical methods**. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1990. 495 p.

MUCHOW, R.C.; DAVIS, R. Effect of nitrogen supply on the comparative productivity of maize and sorghum in a semi-arid tropical environment. II. Radiation interception and biomass accumulation. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 18, p. 17-30, 1988.

- MUCHOW, R.C.; EVENSEN, C.I.; OSGOOD, R.V.; ROBERTSON, M.J. Yield accumulation in irrigated sugarcane: II. Utilization of intercepted radiation. **Agronomy Journal**, Madison, v. 89, p. 646-652, 1997.
- MUCHOW, R.C.; SPILLMAN, M.F.; WOOD, A.W.; THOMAS, M.R. Radiation interception and biomass accumulation in a sugarcane crop grown under irrigation tropical conditions. **Australian Journal of Agricultural Research**, Victoria, v. 45, p. 37-49, 1994.
- MUNAKATA, K. Simulation of population photosynthesis and dry matter production. In: MATSUO, T.; KUMAZAWA, K.; ISHII, R.; ISHIHARA, K.; HIRATA, H. (Ed.). **Science of the rice plant**. Tokyo: Physiology, Food and Agricultural Policy Research Center, 1995. v. 2, p. 671-684.
- MURTA, R.M.; TEODORO, S.M.; BONOMO, P.; CHAVES, M.A. Precipitação pluvial mensal em níveis de probabilidade pela distribuição gama para duas localidades do sudoeste da Bahia. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 29, n. 5, p. 988-994, 2005.
- NASCIMENTO, A.M.; ZUCCHI, A.L. **Modelos de simulação**. 1997. 40 p. Trabalho (Monografia) - Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.
- NASSIF, D.S.P. **Parametrização e avaliação do modelo DSSAT/CANEGRO para variedades brasileiras de cana-de-açúcar**. 2010. 92 p. Dissertação (Mestrado em Física do Ambiente Agrícola) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.
- NAYLOR, T. H. **Computer simulation experiments with models of economic systems**. New York: John Wiley, 1971. 502 p.
- NICKELL, L.G. Sugarcane. In: ALVIN, P. KOZLOWSKI, T. (Ed.). **Ecophysiology of tropical crops**. New York: Academic Press, 1977. p. 89-110.
- OLIVEIRA, R.A. **Modelagem da produtividade da cana-de-açúcar para as principais regiões produtoras de Minas Gerais**. 2010. 110 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.
- OMETTO, J.C. **Equação para a estimativa de evapotranspiração potencial, sua aplicação no cálculo das necessidades hídricas e do rendimento agro-industrial da cana-de-açúcar na região de Piracicaba – SP**. 1974. 129 p. Tese (Livre Docência) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1974.
- _____. **Parâmetros meteorológicos e a cultura da cana-de-açúcar**. Piracicaba: ESALQ, 1980. 17 p.
- _____. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1981. 425 p.
- ORGANIZAÇÃO METEOROLÓGICA MUNDIAL. **Drought and agriculture**. Geneva, 1975. 127 p. (WMO Tech. Note 138; Publ. WMO-392).
- PACHECO, P.; ALONSO, N.; GUTIÉRREZ, A. A study of the sugar cane evapotranspiration in Cuba. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF

SUGAR CANE TECHNOLOGISTICS, 18., 1983, Ciudad de la Habana. **Proceedings...** Ciudad de la Habana: Society of Sugar Cane Technologists. 1983. p. 380-387.

PAULA, F.L.M.; STRECK, N.A.; HELDWEIN, A.B.; BISOGNIN, D.A.; PAULA, A.L.; DELLAI, J. Soma térmica de algumas fases do ciclo de desenvolvimento da batata (*Solanum tuberosum* L.). **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 5, p. 1034-1042, 2005.

PAUTIAN, K.; PARTON, W.J.; PERSSON, J. Modeling soil organic matter in organic-amended and nitrogen fertilized long-term plots. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, n. 2, p. 476-488, 1992.

PEDRO JÚNIOR, M.J.; CAMARGO, M.B.P.; BRUNINI, O.; ALFONSI, R.R.; ORTOLANI, A.A.; MIRANDA, M.A.C. Teste de modelo agrometeorológico para estimativa da produtividade potencial da cultura da soja de ciclo precoce. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 3., 1983, Campinas. **Anais...** Campinas, 1983. p. 11-17.

PENNING DE VRIES, F.W.T. System analysis and models of crop growth. In: PENNING DE VRIES, F.W.T.; VAN LAAR, H.H. (Ed.). **Simulation of plant growth and crop production**. Wageningen: Pudoc., 1982. p. 9-22.

PENNING DE VRIES, F.W.T.; JANSEN, D.M.; TEN BERGE, H.F.M.; BAKEMA, A. **Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops**. Wageningen: Pudoc, 1989. 271p.

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

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

PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, G.C. **Evapo (transpi) razão**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183 p.

PESSOA, M.C.P.Y.; LUCHIARI JUNIOR, A.; FERNANDES, E.N.; LIMA, M.A. **Principais modelos matemáticos e simuladores utilizados para a análise de impactos ambientais das atividades agrícolas**. Brasília: EMBRAPA, 1997. 44 p.

RADFORD, P.J. Growth analysis formulase - their use and abuse, **Crop Science**, Madison, v. 7, n. 3, p. 171-175, 1967.

RAE, A.L.; GROF, C.P.L.; CASU, R.E.; BONNETT, G.D. Sucrose accumulation in the sugarcane stem: pathways and control points for transport and compartmentation. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, n. 2/3, p. 159-168, 2005.

RAVEN, P.H. **Biologia vegetal**. Rio de Janeiro: Guanabara-Koogan, 2007. 830 p.

RIBEIRO, A.A.A.; LUNARDI, D.M.C. A precipitação mensal provável para Londrina, PR, através da função gama. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 12, n. 4, p. 37-44, 1997.

- RIMMINGTON, G.M.; CHARLES-EDWARDS, D.A. Mathematical descriptions of plant growth and development. In: WISIOL, K.; HESKETH, J.D. **Plant growth modeling for resource management: current models and methods**. Boca Raton: CRC Press, 1987. v. 1, p. 3-15.
- RIPOLI, T.C.C.; RIPOLI, M.L.C. **Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente**. Piracicaba: Barros & Marques Ed. Eletrônica, 2004. 302 p.
- RIPOLI, T.C.C.; RIPOLI, M.L.C.; CASAGRANDE, D.V.; IDE, B.Y. **Plantio de cana-de-açúcar: estado da arte**. Piracicaba: Barros & Marques Editoração Eletrônica, 2006. 216 p.
- RHODES, I. Relationship between canopy structure and productivity in herbage grasses and its implications for plant breeding. **Herbage Abstracts**, Wallingford, v. 43, p. 129-133, 1973.
- ROBERTSON, M.J.; DONALDSON, R.A. Changes in the components of cane and sucrose yield in response to drying-off before harvest. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 55, p. 201-208, 1998.
- ROBERTSON, M.J.; WOOD, A.W.; MUCHOW, R.C. Growth of sugarcane under high input conditions in tropical Australia. I. Radiation use, biomass accumulation and partitioning. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 48, p. 11-25, 1996.
- ROBERTSON, M.J.; INMAM-BAMBER, N.G.; MUCHOW, R.C.; WOOD, A.W. Physiology and productivity of sugar cane with early and mid-season water deficit. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 64, p. 211-227, 1999.
- RODRIGUES, J.D. **Fisiologia da cana-de-açúcar**. Botucatu: UNESP, 1995. 75 p.
- ROJAS, J.S.D. **Modelo agrometeorológico para estimativa dos efeitos de deficiência hídrica na produtividade agro-industrial da cana-de-açúcar**. 1998. 74 p. Dissertação (Mestrado em Agrometeorologia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.
- ROLIM, G.S.; ESCOBEDO, J.F.; OLIVEIRA, A.P. Aplicação do modelo de *Deardorf* (1978) para simulação do balanço de energia da cana-de-açúcar: resultados de primavera. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 12., 2002, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu, 2002. p. 2774-2782.
- ROSENTHAL, W.D.; GERIK, T.J. Radiation use efficiency among cotton cultivars. **Agronomy Journal**, Madison, v. 83, p. 655-658, 1991.
- RUIZ-CORRÊA, S.T.; DOURADO-NETO, D.; LORENCONI, R.; SCARPARE, F.V. ; VIVIAN, R.; RUIZ, E.T. Aplicações e limitações da modelagem em agricultura: revisão. **Revista de Agricultura**, Piracicaba, v. 86, p. 1-13, 2011.
- SACHS, R.C.C. Remuneração da tonelada de cana no Estado de São Paulo. **Informações Econômicas**, São Paulo, v. 37, n. 2, p. 55-66, 2007.
- SAGE, R.F. The evolution of C₄ photosynthesis. **New Phytologist**, UK, v. 161, n. 2, p. 341-370, 2004.

SALASSI, N.E.; BREAU, J.B.; NAQUIN, C.J. Modeling within-season sugar cane growth for optimal harvest system selection. **Agricultural System**, Amsterdam, v.73, n.3, p.261-278, 2002.

SCARPARE, F.V.; SCARPARE FILHO, J.A.; RODRIGUES, A.; REICHARDT, K.; ANGELOCCI, L.R. Growing degree-days for the 'Niagara Rosada' grapevine pruned in different seasons. **International Journal of Biometeorology**, Berlin, v. 56, p. 823-830, 2012.

SANGOI, L.; SILVA, P.R.F. Comparação entre métodos de cálculo de unidades térmicas e os dias do calendário na previsão de subperíodos de desenvolvimento do girassol. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 21, p. 901-908, 1986.

SAKAI, R.H.; MARIN, F.R.; NASSIF, D.S.P.; VITTI, A.C.; ROSSETTO, R. Arquitetura foliar e coeficiente de extinção de radiação solar para duas variedades de cana-de-açúcar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 16., 2009, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte, 2009. p. 58-62.

SAN JOSÉ, J.J.; MEDINA, E. Análisis de la productividad de caña de azúcar. I. Crecimiento, desarrollo de la superficie foliar y contenido de clorofila de caña de azúcar 'PR 980'. **Turrialba**, San Jose, v. 20, n. 2, p. 143-148, 1970.

SANSIGOLO, C.S.; NERY, J.T. Distribuição de extremos de temperatura mínima no Estado do Paraná, **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 8, n. 2, p. 247-253, 2000.

SANTOS, J.E. dos. Procedimentos básicos para a modelagem ecológica. **Ciência e Cultura**, Rio de Janeiro, v.33, n.6, p.983-992, 1986.

SANTOS, M.C.; SENTELHAS, P.C.; MARIN, F.R. Calibração do modelo agrometeorológico da FAO para a estimativa da produtividade potencial e real da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.). In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 14., 2006, Piracicaba. **Anais...** São Paulo: USP, 2006. 1 CD-ROM.

SCARPARE, F.V. **Simulação do crescimento da cana-de-açúcar pelo modelo agrohidrológico SWAP/WOFOST**. 2011. 163 p. Tese (Doutorado em Física do Ambiente Agrícola) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

SCARPARE, F.V.; VAN LIER, Q.J.; RUIZ-CORRÊA, S.T.; BARROS, A.H.C.; MARIN, F.R.; NASSIF, D.S.P. Modelos de crescimento da cana-de-açúcar e sua parametrização – revisão. **Revista de Agricultura**, Piracicaba, v. 87, p. 66-80, 2012.

SCARPARI, M.S.; BEAUCLAIR, E.G.F. de. Sugarcane maturity estimation through edaphic-climatic parameters. **ScientiaAgricola**, Piracicaba, v.61, n.5, p.486-491, 2004.

_____. Variação espaço-temporal do índice de área foliar e do brix em cana-de-açúcar. **Bragantia**, Campinas, v. 67, n. 1, p. 35-41, 2008.

SEDIYAMA, G.C.; CHANCELLOR, W.J.; BURKHARDT, T.H. Simulação de parâmetros climáticos para a época de crescimento das plantas. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 25, n. 141, p. 455-466, 1978.

SEDIYAMA, G.C.; MELO, J.S.P.; ALVES, A.R. Determinação dos parâmetros da distribuição gama, em função das alturas médias mensais de precipitação dos dias chuvosos. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 43, n. 247, p. 254-266, 1995.

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

SILVA, D.K.T.; DAROS, E.; ZAMBOM, J.L.C.; WEBER, H.; IDO, O.T.; UPELLATTORIBAS, K.C.; KOEHLER, H.S.; OLIVEIRA, R.A. Análise de crescimento em cultivares de cana-de-açúcar em cana soca no noroeste de Paraná na safra 2002/2003. **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 6, p. 47-53, 2005.

SILVA, J.B.; LLOPART, M.P.; BOIASKI, N. Temperatura máxima do ar em Pelotas, RS - Tabelas de probabilidade em escalas de tempo pentadal. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 20, n. 2, p. 267-276, 2005.

SILVA, J.C. da; HELDWEIN, A.B.; MARTINS, F.B.; TRENTIN, G.; GRIMM, E.L. Análise de distribuição de chuva para Santa Maria, RS. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 1, p. 67-72, 2007.

SINCLAIR, T.R.; HORIE, T. Leaf nitrogen, photosynthesis, and crop radiation use efficiency: a review. **Crop Science**, Madison, v. 29, p. 90-98, 1989.

SINCLAIR, T.R.; MUCHOW, R.C. Radiation use efficiency. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 65, p. 215-265, 1999.

SINCLAIR, T.R.; GILBERT, R.A.; PERDOMO, R.E.; SHINE JR., J.M.; POWELL, G.; MONTES, G. Sugarcane leaf area development under field conditions in Florida, USA. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 88, p. 171-178, 2004.

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

SINGELS, A.; SMIT, M.A. The effect of row spacing on an irrigated plant crop of sugarcane variety NCo376. **Proceedings of the South African Sugar Technologists Association**, Durban, v. 76, p. 94-105, 2002.

SINGELS, A.; JONES, M.; VAN DEN BERG, M. **DSSAT v4.5 - Canegro Sugarcane Plant Module – Scientific documentation**. South African Sugarcane Research: International Consortium for Sugarcane Modelling, 2008. 34 p.

SINGELS, A.; KENNEDY, A.J.; BEZUIDENHOUT, C.N. IRRICANE: a simple irrigation scheduling procedure for sugarcane using automatic weather stations. **Proceedings of the South African Sugar Technologists Association**, Durban, v. 72, p. 117-122, 1998.

SINGELS, A.; SMIT, M.A.; REDSHAW, K.A.; DONALDSON, R.A. The effect of crop start date, crop class and cultivar on sugarcane canopy development and radiation interception. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, p. 249–260, 2005.

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

SPITTERS, C.J.T.; TOUSSAINT, H.A.J.M.; GOUDRIAAN, J. Separating the diffuse and direct component of global radiation and its implications for modeling canopy photosynthesis Part I. Components of incoming radiation. **Agricultural and Forest Meteorology**, Oxford, v. 38, n. 2, p. 217-229, 1986.

SPITTERS, C.J.T.; SCHAPENDONK, A.H.C.M. Evaluation of breeding strategies for drought tolerance in potato by means of crop growth simulation. **Plant and Soil**, Amsterdam, v. 123, p. 193-203, 1990.

STEINMETZ, S.; INFELD, J.A.; ASSIS, F.N.; WREGGE, M.S.; FERREIRA, J.S.A. **Uso do método de graus-dia para estimar a data de diferenciação da panícula de grupos de cultivares de arroz irrigado no Rio Grande do Sul**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2004. 14 p.

STOCKLE, C.O. Simulation models in agriculture: from cellular level to field scale. In: SUMMER CONFERENCE, COMPUTER SIMULATION SOCIETY, 1989, Austin. **Proceedings...** p. 639-644.

SU, C.L.; LEE, Y.M. Development status and life cycle inventory analysis of biofuels in Taiwan. **Energy Policy**, Surrey, v. 37, n. 2, p. 754–758, 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.

SUGUITANI, C.; MATSUOKA, S. Efeitos do fósforo nas características industriais e na produtividade agrícola em cana-de-açúcar (cana-planta) cultivada em duas regiões do estado de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 2001, Londrina. **Ciência do solo: fator de produtividade competitiva com sustentabilidade; Resumos...** Londrina: SBCS, 2001. p. 219.

TAIZ, L.; ZIEGER, E. **Fisiologia vegetal**. Trad. de E.R. Santarém. 3. ed. Porto Alegre: Artemed, 2004. 719 p.

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

TERAMOTO, E.R. **Avaliação e aplicação de modelos de estimativa de produção de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) baseados 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.

THOM, H.C.S. **Some methods of climatological analysis**. Geneve: World Meteorological Organization, n° 199 TP 103, 1966. 53 p. (Technical Note, 81).

THORNLEY, J.H.M. **Mathematical models in plant physiology**: a quantitative approach to problems in plant and crop physiology, London: Academic Press, 1976. 318 p.

THORNLEY, J.H.M.; JOHNSON, I.R. **Plant and crop modeling**. Oxford: Oxford University Press, 1990. 669p.

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

VAN DAM, J.C.; GROENENDIJK, P.; HENDRIKS, R.F.A.; KROES, J.G. Advances of modeling water flow in variably saturated soils with SWAP. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 7, n. 2, p. 640-653, 2008.

VAN HEEMST, H.D.J. Crop phenology and dry matter distribution. In: VAN KEULEN, H.; WOLF, J. (Ed.). **Modelling of agricultural production**: weather, soils and crops. Wageningen: PUDOC, 1986. p. 27-40.

VAN KEULEN, H.; WOLF, J. **Modeling of agricultural production**: weather, soils and crops. Wageningen: Pudoc, 1986. 463 p.

VAN KEULEN, H.; PENNING DE VRIES, F.W.T.; DRESS, E.M. A summary model for crop growth. In: PENNING DE VRIES, F.W.T.; VAN LAAR, H. H. (Ed.). **Simulation of plant growth and crop production**. Wageningen: Pudoc, 1982. p. 87-97.

VAN ITTERSUM, M.K.; LEFFELAAR, P.A.; KEULEN, H. van; KROPFF, M.J.; BASTIAANS, L.; GOUDRIAAN, J. On approaches and applications of the Wageningen crop models. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 18, n. 3/4, p. 201-234, 2003.

VILLA NOVA, N.A. **Dados meteorológicos do município de Piracicaba**. Piracicaba: ESALQ, Departamento de Ciência Exatas, 2003. 2 p.

VILLA NOVA, N.A.; BARBIERI, V. Consideração sobre a viabilidade da cana-de-açúcar na região de Piracicaba, SP. In: CURSO DE AGRICULTURA IRRIGADA, 1991, Piracicaba. Piracicaba: ESALQ, 1991. p. 76-82.

VITTI, G.C.; MAZZA, J.A. Planejamento, estratégias de manejo e nutrição da cultura de cana-de-açúcar. **Informações Agronômicas**, Piracicaba: Potafós, n. 97, p. 1-16, 2002.

VON CAEMMERER, S. **Biochemical models of leaf photosynthesis**. Collingwood: CSIRO Publishing, 2000. 165 p.

VON CAEMMERER, S; FURBANK, R.T. The C₄ pathway: an efficient CO₂ pump. **Photosynthesis Research**, Springer, UK, v. 77, n. 2/3, p. 191-207, 2003.

WATT, D.A; McCORMICK, A.J.; GOVENDEN, C.; CARSON, D.L.; CRAMER, M.D.; HUCKETT, B.I.; BOTHA, F.C. Increasing the utility of genomics in unraveling sucrose accumulation. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, n. 2/3, p. 149-158, 2005.

WEIBULL, W.A. A Statistical distribution function of wide applicability, ASME. **Journal of Applied Mechanics**, Amsterdam, v. 18, p. 293-297, 1951.

WIEDENFELD, R.P. Water stress during different sugarcane growth periods on yield and response to N fertilizer. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 43, n. 2, p. 173–182, 2000.

WILKS, D.S. Interannual variability and extreme-value characteristics of several stochastic daily precipitation models. **Agricultural and Forest Meteorology**, Oxford, v. 93, n. 3, p. 153-169, 1999.

WILLMOTT, C.J. On the validation of models. **Physical Geography**, Silver Spring, v. 2, p. 184-194, 1981.

WIT, C.T. de. **Simulation of assimilation, respiration and transpiration of crops**. Wageningen: Centre for Agricultural Publishing and Documentation, 1978. 141 p.

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

XIN, Z.; BROWSE, J. Cold comfort farm: the acclimation of plants to freezing temperatures. **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v. 23, p. 893-902, 2000.

XUE, Q.; WEISS, A.; BAENZIGER, P.S. Predicting leaf appearance in field grown winter wheat: evaluating linear and non-linear models. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 175, p. 261-270, 2004.

YUE, S.; QUARDA, T.B.M.J.; BOBÉE, B. A review of bivariate gamma distributions of hydrological application. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 241, p. 1-18, 2001.

ZADOKS, J.C.; RABBINGE, R. Modelling to a purpose. In: GILLIGAN, C.A. (Ed.). **Mathematical modelling of crop disease**. London: Academic Press, 1985. p. 231–244.

ZHOU, M.M.; SINGELS, A.; SAVAGE, M.J. Physiological parameters for modeling differences in canopy development between sugarcane cultivars. Proceedings of the **South African Sugar Technology Association**, Durban, v. 77, p. 610–621, 2003.