

FUNDAÇÃO GETULIO VARGAS
ESCOLA DE ECONOMIA DE SÃO PAULO

MARCELO RODRIGUES ALAMBERT

ESTIMAÇÃO ESTOCÁSTICA DE PARÂMETROS PRODUTIVOS DA SOJA:
uso do modelo PPDSO em um estudo de caso em Piracicaba/SP

SÃO PAULO
2010

MARCELO RODRIGUES ALAMBERT

ESTIMAÇÃO ESTOCÁSTICA DE PARÂMETROS PRODUTIVOS DA SOJA:
uso do modelo PPDSO em um estudo de caso em Piracicaba/SP

Dissertação apresentada à Escola de Economia de São Paulo da Fundação Getúlio Vargas, como requisito para obtenção do título de Mestre Profissional em Agroenergia.

Campo de Conhecimento: Fitotecnia

Orientador: Prof. Dr. Durval Dourado Neto

SÃO PAULO
2010

Alambert, Marcelo Rodrigues.

Estimação Estocástica de Parâmetros Produtivos da Soja: uso do modelo PPDSO em um estudo de caso em Piracicaba/SP / Marcelo Rodrigues Alambert. – 2010.

108 f.

Orientador: Durval Dourado Neto

Dissertação (MPA) - Escola de Economia de São Paulo.

1. Óleo de soja. 2. Soja – Cultivo – Piracicaba (SP). 3. Produtividade agrícola – Modelos matemáticos. 4. Processo estocástico. I. Dourado Neto, Durval. II. Dissertação (MPA) - Escola de Administração de Empresas de São Paulo. III. Título.

CDU 633.34(816.1)

MARCELO RODRIGUES ALAMBERT

ESTIMAÇÃO ESTOCÁSTICA DE PARÂMETROS PRODUTIVOS DA SOJA:
uso do modelo PPDSO em um estudo de caso em Piracicaba/SP

Dissertação apresentada à Escola de Economia de São Paulo da Fundação Getúlio Vargas, como requisito para obtenção do título de Mestre Profissional em Agroenergia.

Campo de Conhecimento: Fitotecnia

Orientador: Prof. Dr. Durval Dourado Neto

Data de Aprovação

____/____/____

Prof. Dr. Durval Dourado Neto (orientador)
USP - ESALQ

Prof. Dr. Joelsio José Lazzarotto
EMBRAPA - CNPUV

Prof. Dr. Pedro Jacob Christoffoleti
USP - ESALQ

*Dedico à minha mãe, Almiria,
por nunca medir esforços para
educar seus filhos.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço:

Primeiramente a Deus pelas oportunidades que tive e pelas boas pessoas que colocou em meu caminho.

À minha mãe, Almiria, e à minha madrinha, Altiva, que sempre me apoiaram na vida, nos estudos e nos desafios de minha trajetória profissional.

Aos meus avôs, Arnaldo e Antonia, por me ensinarem os primeiros passos com agricultura e a amar a profissão que escolhi.

Ao Prof. Dr. Durval Dourado Neto, pela orientação, amizade e dedicação.

Ao Prof. Dr. Eduardo Delgado Assad, pela orientação quanto ao uso de dados climáticos.

Aos colegas do MPAGro que, com suas diferentes trajetórias profissionais, proporcionaram visões diferentes da agricultura, além de apoio, amizade e grandes momentos.

SUMÁRIO

RESUMO	9
ABSTRACT	10
LISTA DE FIGURAS	11
LISTA DE TABELAS	15
1 INTRODUÇÃO.....	22
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1 Aspectos gerais da produção de soja	24
2.1.1 Classificação botânica e centro de origem.....	24
2.1.2 A cultura de soja no Brasil e no mundo.....	24
2.1.3 A produção de óleo de soja no Brasil e no mundo	27
2.1.4 Importância econômica da produção de óleo no Brasil e no mundo	28
2.1.5 Estrutura do mercado no Brasil	30
2.2 Ecofisiologia da produção de soja	31
2.2.1 Índice de área foliar	31
2.2.2 Radiação solar.....	32
2.2.3 Temperatura do ar.....	33
2.2.4 Fotoperíodo	36
2.2.5 Nitrogênio e dióxido de carbono	37
2.2.6 Água.....	39
2.2.7 Fenologia	40
2.3 Modelagem da produção.....	43
2.3.1 O modelo LINTUL	43
2.3.2 Produtividade potencial de grãos e de óleo	44
3 MATERIAL E MÉTODOS	46
3.1 O modelo	46
3.1.1 Fenologia e análise de crescimento	48
3.1.1.1 Partição de fotoassimilados	48
3.1.1.2 Desenvolvimento relativo.....	49
3.1.1.4 Área foliar	52

3.1.1.5	Produção da biomassa e eficiência no uso da radiação	54
3.1.1.6	Partição de fotoassimilados	56
3.1.1.7	Conversão de fotoassimilados	57
3.1.1.8	Fitomassa seca.....	59
3.1.1.9	Cálculo da produtividade potencial de grãos e de óleo	60
3.1.2	Fator de depleção.....	60
3.1.3	Elementos do clima.....	61
3.2	Tratamento estatístico	61
3.3	Datas de semeadura	64
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	65
4.1	Variação temporal da temperatura em Piracicaba (SP)	65
4.2	Variação temporal da radiação em Piracicaba (SP).....	67
4.3	Radiação global e radiação fotossinteticamente ativa interceptada.....	68
4.4	Índice de área foliar	70
4.5	Duração do ciclo	72
4.6	Partição de fotoassimilados	76
4.7	Massa de matéria seca	77
4.8	Produtividade potencial e deplecionada de grãos	79
4.9	Produtividade e teor de óleo	84
5	CONCLUSÕES	89
	REFERÊNCIAS	90
	ANEXO I.....	99
	ANEXO II	105

RESUMO

Estimação estocástica de parâmetros produtivos da soja: uso do modelo PPDSO em um estudo de caso em Piracicaba/SP

O Brasil é o segundo produtor mundial de soja [*Glycine max* (L.) Merr.] e o sétimo de óleo vegetal. A produção brasileira desta oleaginosa alcançou 61 milhões de toneladas na safra 2007/08 e projeta-se, para 2020, produção de 105 milhões de toneladas. O consumo de biodiesel em 2008 representou um milhão de toneladas e a demanda por este biocombustível deverá atingir 3,1 milhões de toneladas em 2020. Para atender esta demanda haverá ampliação da área plantada principalmente na região Centro-Oeste, mas também exigirá esforços no aumento de produtividade. Visando melhor conhecimento das inferências das variáveis climáticas temperatura e radiação global sobre o desenvolvimento da soja e sua produtividade de grãos e óleo, foi proposto um modelo estocástico com distribuição normal truncada para os dados de temperatura máxima, mínima e média. Também foi incluído neste modelo distribuição triangular assimétrica para determinação da produtividade de óleo mais provável. Foram estipuladas oito datas de semeadura para a localidade de Piracicaba/SP onde está localizada a estação meteorológica da ESALQ/USP, fornecedora dos dados climáticos utilizados neste estudo. Conclui-se que: (i) ao longo das datas de semeadura houve redução do ciclo com o aumento da temperatura média; (ii) a redução do ciclo da cultura de soja interferiu nas produtividades de grãos e de óleo; (iii) a radiação global média nos trinta dias após a antese refletiram-se na partição de fotoassimilados e na produtividade de grãos e óleo; (iv) os modelos estocásticos podem ser utilizados para a previsão das produtividades de soja e óleo.

Palavras-chave: Modelo de crescimento de cultura, Partição de fotoassimilados, Matéria seca.

ABSTRACT

Soybean yield and oil productivity estochastic estimation: PPDSO model use in Piracicaba/SP

Brazil is the second major soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] producer and the seventh one on soybean oil. Brazilian production reached 61 million tons at 2008 and the forecast to 2020 is 105 million tons. Biodiesel consumption at 2008 was one million tons and the demand for this biofuel will reach 3,1 million tons at 2020. To amount this demand, the planting area on center-west region of Brazil will increase, but also efforts on productivity must be required. Looking for a better knowledge on the climate variables temperature and global radiation over soybean development, yield and oil productivity was purposed a stochastic model with truncated normal distribution for maximum, minimum and average temperature data. Included in this model, a triangular asymmetric distribution to determine the probable oil productivity. Eight sowing dates were stipulated on Piracicaba/SP where the climate data was given from ESALQ/USP agrometeorologic station. The conclusions were: (i) there were decreases on soybean cycle duration with the average temperature increase; (ii) the soybean cycle decrease restricted soybean yield and oil productivity; (iii) the global radiation thirty days after antesis reflected on photo assimilates partition and soybean yield and oil productivity; (iv) stochastic models can be used for soybean yield and oil productivity forecast.

Key words: Crop growth models, Photo assimilates partition, Dry matter.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Máxima taxa de fotossíntese na folha ($\text{kg. ha}^{-1}.\text{dia}^{-1}$ de CO_2) em função da temperatura da folha (T_{bl} : temperatura basal inferior - 10°C e T_{bs} : temperatura basal superior - 40°C) com a adição de uma faixa de variação para a temperatura ótima (T_o , $^\circ\text{C}$). Adaptado de PENNING DE VRIES et al., 1989, p. 34 35
- Figura 2 - Variação no fotoperíodo em diferentes latitudes, e as respectivas datas de indução floral para planta de dias curtos (PDC). Fonte: CORRÊA, 2008, p. 32 36
- Figura 3 - Distribuição sazonal da assimilação bruta de CO_2 por uma cultura de trigo fechada e verde (curva 1), porcentagem de luz interceptada pela cultura (curva 2) e taxa de crescimento potencial da cultura (curva 3) Fonte: Adaptado de LÖVENSTEIN et al., 1995, p. 35 38
- Figura 4 - Estádios de desenvolvimento da cultura de soja durante o período juvenil: Estádio VE – emergência dos cotilédones; VC – cotilédones desenvolvidos e folhas unifoliadas expandidas; V1 – folhas unifoliadas completamente desenvolvidas e folhas trifoliadas superiores desenroladas. Fonte: Adaptado de Universidade de Michigan (2005) 41
- Figura 5 - Modelo estocástico utilizado para o cálculo da produtividade potencial de óleo de soja. Legenda: (I) variáveis de entrada: dia Juliano (j), variável aleatória com distribuição normal (média nula e desvio padrão unitário) gerada utilizando procedimento estocástico (a partir de uma variável aleatória de distribuição uniforme entre 0 e 1) (z), temperatura média (mT), desvio padrão referente à temperatura média (sT), temperatura mínima (T_m), temperatura máxima (T_M), temperatura basal (T_b), valores críticos de desenvolvimento relativo (Dr^*) e de partição de carboidrato (p^*), radiação global (Q_g), coeficiente de extinção de radiação (k), eficiência de utilização de radiação (EUR), área foliar específica (AFe), índice de colheita (IC) e teor de água (u) e de óleo (To) no grão; (II) variáveis de cálculo: temperatura média diária simulada (T_s), desenvolvimento relativo da cultura de soja (Dr), índice de área foliar (IAF), partição de carboidrato à folha (pF), haste (pH), órgão reprodutivo (pOR) e raiz (pR), radiação fotossinteticamente ativa (RFA), taxa de senescência relativa (TSr), crescimento diário de folha verde ($cdFv$), folha seca ($cdFs$), folha (cdF), haste (cdH), órgão reprodutivo ($cdOR$), raiz (cdR) e fitomassa seca total ($cdFST$) e crescimento acumulado de folha verde ($caFv$), haste (caH), órgão reprodutivo ($caOR$), raiz (caR) e fitomassa seca total

(caFST), senescência foliar (sF) e produtividade potencial de grãos (PPg); e (III) <u>variável de saída: produtividade potencial de óleo (PPo)</u>	47
Figura 6 - Visão geral dos estágios de desenvolvimento no ciclo de vida de uma cultura conforme os respectivos estágios de desenvolvimento e partição de fotoassimilados. Fonte: Adaptado de LÖVENSTEIN et al., 1995, p. 36	50
Figura 7 - Partição de fotoassimilados de folhas, raízes, caule, órgãos de armazenamento da cultura da soja conforme estágios de desenvolvimento relativo. Fonte: PENNING DE VRIES et al., 1989, p. 91	57
Figura 8 - Variabilidade temporal da série histórica anual de temperatura média diária (°C) e a temperatura média histórica anual em Piracicaba (SP)	65
Figura 9 - Variabilidade temporal de temperatura média diária (°C) na localidade de Piracicaba (SP) para semeaduras em setembro e outubro.....	66
Figura 10 - Variabilidade temporal de temperatura média diária (°C) na localidade de Piracicaba (SP) para semeaduras em novembro e dezembro.....	67
Figura 11 - Variabilidade temporal da série histórica anual de radiação global média diária (Q_g , $MJ.m^{-2}.dia^{-1}$) em Piracicaba (SP).....	68
Figura 12 - Radiação global média diária ($MJ.m^{-2}.dia^{-1}$) e radiação fotossinteticamente ativa interceptada (RFA, $MJ.m^{-2}.dia^{-1}$) para a localidade de Piracicaba (SP) em semeaduras efetuados em setembro, outubro e novembro.....	69
Figura 13 - Radiação global média diária ($MJ.m^{-2}.dia^{-1}$) e radiação fotossinteticamente ativa interceptada (RFA, $MJ.m^{-2}.dia^{-1}$) para a localidade de Piracicaba (SP) em semeaduras efetuados em dezembro	70
Figura 14 - Índice de área foliar (IAF, $m^2.m^{-2}$) e radiação fotossinteticamente ativa interceptada (RFA, $MJ.m^{-2}.dia^{-1}$) para a localidade de Piracicaba (SP) em semeaduras efetuadas em setembro, outubro e novembro	71
Figura 15 - Índice de área foliar (IAF, $m^2.m^{-2}$) e radiação fotossinteticamente ativa interceptada (RFA, $MJ.m^{-2}.dia^{-1}$) para a localidade de Piracicaba (SP) em semeaduras efetuadas em dezembro	72
Figura 16 - Diagrama dos ciclos produtivo e total considerando sete dias para emergência e quinze dias para colheita	72

- Figura 17 - Duração do ciclo produtivo resultantes do modelo PPDSO para a localidade de Piracicaba (SP) após 1.000 simulações: (a) frequência de resultados de duração do ciclo produtivo; (b) frequência acumulada, (1) semeadura em primeiro de setembro, (2) semeadura em quinze de setembro 73
- Figura 18 - Duração do ciclo produtivo resultantes do modelo PPDSO para a localidade de Piracicaba (SP) após 1.000 simulações: (a) frequência de resultados de duração do ciclo produtivo; (b) frequência acumulada, (1) semeadura em primeiro de outubro, (2) semeadura em quinze de outubro, (3) semeadura em primeiro de novembro 74
- Figura 19 - Duração do ciclo produtivo resultantes do modelo PPDSO para a localidade de Piracicaba (SP) após 1.000 simulações: (a) frequência de resultados de duração do ciclo produtivo; (b) frequência acumulada, (1) semeadura em quinze de novembro, (2), semeadura em primeiro de dezembro, (3) semeadura em quinze de dezembro 75
- Figura 20 - Partição de fotoassimilados resultantes do modelo PPDSO para a localidade de Piracicaba (SP) em semeaduras efetuadas em setembro e outubro 76
- Figura 21 - Partição de fotoassimilados resultantes do modelo PPDSO para a localidade de Piracicaba (SP) em semeaduras efetuadas em novembro e dezembro 77
- Figura 22 - Massa de matéria seca resultantes do modelo PPDSO para a localidade de Piracicaba (SP) em semeaduras efetuadas em setembro e outubro 78
- Figura 23 - Massa de matéria seca resultantes do modelo PPDSO para a localidade de Piracicaba (SP) em semeaduras efetuadas em novembro e dezembro 79
- Figura 24 - Distribuição da produtividade potencial e deplecionada resultantes do modelo PPDSO para a localidade de Piracicaba (SP) em semeaduras efetuadas em setembro e outubro, após mil simulações 80
- Figura 25 - Distribuição da produtividade potencial e deplecionada resultantes do modelo PPDSO para a localidade de Piracicaba (SP) em semeaduras efetuadas em novembro e dezembro, após mil simulações 81
- Figura 26 - Médias das produtividades potencial e deplecionada de grãos resultantes do modelo PPDSO para a localidade de Piracicaba (SP) 82
- Figura 27 - Produtividades potencial e deplecionada resultantes do modelo PPDSO com diferentes valores de EUR (g.MJ^{-1}) encontrados na literatura e semeadura em primeiro de setembro para a localidade de Piracicaba (SP) 82

- Figura 28 - Produtividade deplecionada de grãos resultantes do modelo PPDSO para a localidade de Piracicaba (SP), relacionados à: (a) duração do ciclo; (b) temperatura média durante o ciclo; (c) radiação global média durante o ciclo e; (d) radiação global média durante os 30 dias após a antese 83
- Figura 29 - Produtividade potencial de óleo média resultante do modelo PPDSO para a localidade de Piracicaba (SP)..... 84
- Figura 30 - Distribuição da produtividade potencial de óleo resultantes do modelo PPDSO para a localidade de Piracicaba (SP) em semeaduras efetuadas em setembro, após mil simulações 84
- Figura 31 - Distribuição da produtividade potencial de óleo resultantes do modelo PPDSO para a localidade de Piracicaba (SP) em semeaduras efetuadas em outubro e novembro e dezembro, após mil simulações 85
- Figura 32 - Teor de óleo resultantes do modelo PPDSO para a localidade de Piracicaba (SP) após mil simulações: (a) frequência de resultados de teor de óleo; (b) frequência acumulada, (1) semeadura em primeiro de setembro, (2) semeadura em quinze de setembro, (3) semeadura em primeiro de outubro 86
- Figura 33 - Teor de óleo resultantes do modelo PPDSO para a localidade de Piracicaba (SP) após mil simulações: (a) frequência de resultados de teor de óleo; (b) frequência acumulada, (1) semeadura em quinze de outubro, (2) semeadura em primeiro de novembro, (3) semeadura em quinze de novembro 87
- Figura 34 - Teor de óleo resultantes do modelo PPDSO para a localidade de Piracicaba (SP) após mil simulações: (a) frequência de resultados de teor de óleo; (b) frequência acumulada, (1) semeadura em primeiro de dezembro, (2) semeadura em quinze de dezembro 88
- Figura 35 - Função da distribuição densidade de probabilidade triangular da variável aleatória contínua triangular. Fonte: ASSIS, 2004, p. 51..... 107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Número de trabalhos (NT) encontrados conforme palavras-chave no período de 2001 a 2010	23
Tabela 2 - Área colhida, produtividade e produção de soja no Brasil, Argentina, Estados Unidos e no Mundo nas safras de 2004/05 a 2008/09	25
Tabela 3 - Área colhida, produtividade e produção de soja nos principais estados produtores do Brasil nas safras de 2002/03 a 2006/07	26
Tabela 4 - Produção e produtividade de óleo e farelo de soja nos Estados Unidos, China, Argentina, Brasil e no Mundo nas safras 2004/05 a 2008/09.....	27
Tabela 5 - Porcentagem de óleo produzida sobre a produção de soja no Brasil, Argentina, Estados Unidos, China e no Mundo nas safras de 2004/05 a 2008/09	28
Tabela 6 - Produção de óleo vegetal e de óleo de soja no mundo na safra 2007/2008 em mil toneladas	29
Tabela 7 - Consumo de óleo vegetal e de óleo soja no mundo na safra 2007/2008 em mil toneladas	29
Tabela 8 - Participação (%) e disponibilidade de óleos vegetais e gorduras animais (em mil toneladas) no Brasil na safra 2007/08.....	31
Tabela 9 - Número médio de dias para o surgimento de um novo trifólio em diferentes temperaturas.....	34
Tabela 10 - Efeitos de deficiências hídricas, em diferentes estádios reprodutivos, sobre componentes de produção de soja (SIONIT; KRAMER, 1977 apud MARCOS FILHO, 1987).....	40
Tabela 11 - Parâmetros de desenvolvimento da soja usados no modelo PPDSO	48
Tabela 12 - Valores de área foliar específica e área foliar inicial (AF _e e IAF _i , m ² .g ⁻¹) obtidos na literatura.....	53
Tabela 13 - Valores de coeficiente de extinção luminosa (k, m ² de folha por m ² de solo) obtidos na literatura	55
Tabela 14 - Valores de eficiência do uso da radiação (EUR, g.MJ ⁻¹) obtidos na literatura	56
Tabela 15 - Partição de fotoassimilados de folhas, raízes, caule e órgãos de armazenamento da cultura da soja conforme estágios de desenvolvimento relativo	57

- Tabela 16 - Necessidade de glicose na formação (A) e transporte (B) de carboidratos, proteínas, gorduras, lignina, ácidos orgânicos e minerais; necessidade de glicose na redução e transporte de N para formação de proteínas (C); necessidade total ($D = A+B+C$) e fator de conversão ou eficiência de conversão ($EF=1/D$) 58
- Tabela 17 - Valores médios da composição química de folhas, caules e raízes de leguminosas e valor médio dos órgãos de armazenamento (vagens + sementes) de soja divididos em carboidratos (CHO, %), proteínas (PRO, %), lipídeos (LIP, %), lignina (LIG, %), ácidos orgânicos (AOR, %) e minerais (MIN, %) e fator de conversão (CVF, gramas do produto por grama de glicose) 58
- Tabela 18 - Eficiência de conversão em massa de matéria de folha (EC_f , $kg.kg^{-1}$), eficiência de conversão em massa de caule (EC_c , $kg.kg^{-1}$), eficiência de conversão em massa de raiz (EC_r , $kg.kg^{-1}$) e eficiência de conversão em massa de órgãos reprodutivos (EC_o , $kg.kg^{-1}$) de soja 59
- Tabela 19 - Período abrangido, número de anos e fonte dos dados de temperatura e radiação global 61
- Tabela 20 - Dados geodésicos para estimativa da produtividade potencial de óleo de soja 61
- Tabela 21 - Valores de temperatura média (mT , $^{\circ}C$); desvio padrão (sT , $^{\circ}C$); temperatura máxima média (T_M , $^{\circ}C$); temperatura mínima média (T_m , $^{\circ}C$); maior valor de temperatura máxima (MT_M , $^{\circ}C$) e menor valor de temperatura mínima (mT_m , $^{\circ}C$); referentes aos meses de janeiro a março no período de 1966 a 2009. Piracicaba, SP. ESALQ 100
- Tabela 22 - Valores de temperatura média (mT , $^{\circ}C$); desvio padrão (sT , $^{\circ}C$); temperatura máxima média (T_M , $^{\circ}C$); temperatura mínima média (T_m , $^{\circ}C$); maior valor de temperatura máxima (MT_M , $^{\circ}C$) e menor valor de temperatura mínima (mT_m , $^{\circ}C$); referentes aos meses de abril a junho no período de 1966 a 2009. Piracicaba, SP. ESALQ 101
- Tabela 23 - Valores de temperatura média (mT , $^{\circ}C$); desvio padrão (sT , $^{\circ}C$); temperatura máxima média (T_M , $^{\circ}C$); temperatura mínima média (T_m , $^{\circ}C$); maior valor de temperatura máxima (MT_M , $^{\circ}C$) e menor valor de temperatura mínima (mT_m , $^{\circ}C$); referentes aos meses de julho a setembro no período de 1966 a 2009. Piracicaba, SP. ESALQ 102
- Tabela 24 - Valores de temperatura média (mT , $^{\circ}C$); desvio padrão (sT , $^{\circ}C$); temperatura máxima média (T_M , $^{\circ}C$); temperatura mínima média (T_m , $^{\circ}C$); maior valor de temperatura

máxima (MT_M , °C) e menor valor de temperatura mínima (mT_m , °C); referentes aos meses de outubro a dezembro no período de 1966 a 2009. Piracicaba, SP. ESALQ. 103

Tabela 25 - Valores médios de radiação global (Q_g , $MJ.m^{-2}.dia^{-1}$) referentes aos meses de outubro a dezembro no período de 1978 a 2009. Piracicaba, SP. ESALQ..... 104

LISTA DE SIGLAS

AFe - Área Foliar específica
caFST - crescimento acumulado de Fitomassa Seca Total
caFv - crescimento acumulado de Folha Verde
caH - crescimento acumulado de Haste
caOR - crescimento acumulado de Órgão Reprodutivo
caR - crescimento acumulado de Raiz
cdF - crescimento diário de Folha
cdFS - crescimento diário de Folha Seca
cdFST - crescimento diário de Fitomassa Seca Total
cdFV - crescimento diário de Folha Verde
cdH - crescimento diário de Haste
cdOR - crescimento diário de Órgão Reprodutivo
cdR - crescimento diário de Raiz
CNPE - Conselho Nacional de Política Energética
DAS - Dias Após a Semeadura
Dr - Desenvolvimento relativo
ECc - Eficiência de Conversão em massa de caule
ECf - Eficiência de Conversão em massa de matéria de folha
ECo - Eficiência de Conversão em massa de órgãos reprodutivos
ECr - Eficiência de Conversão em massa de raiz
EUR - Eficiência no Uso da Radiação
fd - fator de depleção
IAF - Índice de Área Foliar
IAFi - Índice de Área Foliar inicial
IC - Índice de Colheita
LINTUL - Light Interception and Utilization
mT - Temperatura média
MT_M - Máxima Temperatura Máxima
mT_m - mínima Temperatura mínima

PDC - Planta de Dias Curtos

PPDSO - Produtividade Potencial e Deplecionada de Óleo de Soja

PPg - Produtividade Potencial de grãos

PPo - Produtividade Potencial de óleo

RFA - Radiação Fotossinteticamente Ativa

RFAint - Radiação Fotossinteticamente Ativa interceptada

SF - Senescência Foliar

SUCROS - Simple and Universal Crop growth Simulator

T_{bl} - Temperatura basal Inferior

T_{bs} - Temperatura basal Superior

TEF - Temperatura Efetiva Diária

T_M - Temperatura Máxima

T_m - Temperatura mínima

T_O - Temperatura ótima

To - teor de óleo no grão

TRM - Temperatura Relativa de Mortalidade

Ts - Temperatura média diária simulada

TSr - Taxa de Senescência relativa

TTC - Taxa de Troca de CO₂

USDA - United States Department of Agriculture

LISTA DE ABREVIATURAS

AOR - Ácidos Orgânicos

CHO - Carboidratos

cr - taxa de crescimento relativo

EF - fator de conversão

Fv/Fm - máxima produtividade do PSII

LIG - Lignina

LIP - Lipídeos

MIN - Minerais

pF - partição de carboidrato à Folha

pH - partição de carboidrato à Haste

pOR - partição de carboidrato ao Órgão Reprodutivo

pR - partição de carboidrato à Raiz

PRO - Proteínas

PSII - Fotossistema II

TSUM 1 - Somatório de graus dia da emergência à antese

TSUM 2CE - Somatório de graus dia da antese à maturação

TSUM I - Somatório de graus dia para emergência

LISTA DE SÍMBOLOS

I - radiação fotossinteticamente ativa interceptada

j - dia Juliano

k - coeficiente de extinção de radiação

p - partição de carboidrato

Qg - Radiação global

sT - desvio padrão referente à temperatura média

u - teor de água

z - variável aleatória com distribuição normal

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é o segundo produtor mundial de soja [*Glycine max* (L.) Merr.] e o sétimo maior produtor de óleo vegetal. A produção brasileira desta oleaginosa alcançou 61 milhões de toneladas na safra 2007/08, mais que dobrando em relação à safra 1997/98 e, em relação à produção de óleo vegetal - 8.274 mil toneladas na safra 2007/08 - o óleo de soja representou 73,3% deste montante.

O consumo de biodiesel em 2008 representou um milhão de toneladas e a demanda por este biocombustível deverá atingir 3,1 milhões de toneladas em 2020. Certamente, esta cultura continuará representando a matéria-prima mais importante para fabricação de biodiesel. Mesmo com a maior oferta de outras oleaginosas importantes como girassol, amendoim, canola e palma, a demanda por soja tanto como fornecedora de biodiesel, como de farelo, continuará crescente com previsão de atingir 105 milhões de toneladas em 2020 (AMARAL, 2009).

A demanda externa por soja também será crescente, além do apelo ecológico e sustentável da produção de biocombustíveis em substituição de combustíveis fósseis, a demanda na importação de farelo de soja para alimentação animal também continuará alta, principalmente em países como China e Índia, onde as populações em crescimento e com maior demanda por proteína de origem animal necessitarão da importação de soja ou farelo para compor rações.

Devido a este cenário, o conhecimento das regiões de maior potencial para produção de soja visando atender à demanda futura do grão, do farelo e do biodiesel é de extrema importância. E não só como a principal fonte de matéria-prima, mas também pela ampla distribuição geográfica, pois ocupa mais de vinte milhões de hectares de norte a sul do país e é devidamente adaptada às mais diversas condições edafo-climáticas, atingindo produtividades elevadas nas mais diversas regiões onde é cultivada.

Neste contexto, o uso de modelagem na estimativa da produtividade potencial justifica-se pela racionalização do uso de recursos, reduzindo o custo e o tempo de pesquisa, e antecipando resultados para tomada de decisão com alta confiabilidade. Utilizando-se de dados históricos de temperatura e insolação, pode-se inferir quais regiões tem maior potencial de produção e direcionar recursos e esforços visando atingir a produtividade potencial.

Apesar destas vantagens da modelagem, é uma técnica ainda pouco usada na cultura da soja, como podemos observar na Tabela 1. Contribuindo com o avanço desta nova ferramenta, o

presente trabalho tem por objetivo estimar a produtividade potencial de grãos e óleo, utilizando dados climáticos de Piracicaba (SP), através da proposição de um modelo. Este modelo considera as características ecofisiológicas da cultura da soja na utilização da radiação global e temperatura e, gera como resultados, a evolução do aproveitamento destes dados climáticos na interceptação da radiação fotossinteticamente ativa e, seu consequente resultado no índice de área foliar, na duração do ciclo, na partição de fotoassimilados e massa de matéria-seca e na produtividade potencial e deplecionada de grãos e óleo. Também são consideradas as vantagens e limitações do modelo e a proposta de novos trabalhos.

Tabela 1 - Número de trabalhos (NT) encontrados conforme palavras-chave no período de 2001 a 2010

Palavra(s)-chave	NT	Palavra(s)-chave	NT
Soybean	25.376	Soja	231
Soybean + oil	5.513	Soja + óleo	Zero
Soybean + yield	4.068	Soja + produção	Zero
Soybean + oil + yield	825	Soja + óleo + produção	Zero
Soybean + modeling	333	Soja + modelagem	Zero
Soybean + modeling + yield	76	Soja + modelagem + produção	Zero
Soybean + modeling + yield + oil	5	Soja + modelagem + produção + óleo	Zero
Soybean + partition	71	Soja + partição	Zero
Soybean + dry matter	1.317	Soja + matéria seca	Zero
Soybean + partition + dry matter	7	Soja + partição + matéria seca	Zero
Soybean + modeling + partition	Zero	Soja + modelagem + partição	Zero
Soybean + modeling + dry matter	7	Soja + modelagem + matéria seca	Zero

Fonte: ISI WEB OF SCIENCE

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta revisão serão abordados três itens distintos da cultura: (i) aspectos gerais da produção de soja, onde se descreve a origem desta oleaginosa e a importância econômica do complexo soja no contexto global e brasileiro; (ii) ecofisiologia da produção, com ênfase nas características da cultura e do ambiente, definidoras da produção de grãos e óleo e; (iii) modelagem da produção, onde o modelo LINTUL, precursor do modelo proposto, e a produtividade potencial são revisados.

2.1 Aspectos gerais da produção de soja

2.1.1 Classificação botânica e centro de origem

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) pertence à família Fabaceae, subfamília Faboideae, tem como provável progenitor a espécie *Glycine ussuriensis* (COSTA, 1996).

Há discordância entre autores sobre o real centro de origem. As regiões centro e oeste da China e também a região nordeste deste mesmo país podem ser originárias da soja, mas todos concordam que o centro de origem é a região leste da Ásia (MIYASAKA, 1981). No Brasil, a soja foi introduzida na Bahia em 1882 e levada para São Paulo em 1892. No Rio Grande do Sul foi cultivada pela primeira vez em 1900 e em 1936 ocorre o início da expansão desta cultura no estado (COSTA, 1996). Na década de 1980 foi introduzida na região dos Cerrados, tornando-se a cultura anual de maior área plantada no país.

2.1.2 A cultura de soja no Brasil e no mundo

Os principais países produtores mundiais de soja em ordem decrescente são os Estados Unidos, o Brasil e a Argentina. Alterações na área ou na produtividade destes três países afetam todo o complexo soja a nível global, pois representam mais de 80% da produção, como pode ser

constatado na Tabela 2. A produtividade média brasileira (2,65 ton.ha⁻¹) é superior à média mundial (2,37 ton.ha⁻¹) e semelhante àquela da Argentina e Estados Unidos.

A produção mundial de soja tem variado nos últimos cinco anos entre 210,84 (safra 08/09) e 237,11 milhões de toneladas (safra 06/07). No Brasil, a produção neste período teve como mínimo 53 milhões de toneladas (safra 04/05) e máximo de 61 milhões de toneladas na safra 07/08 (USDA, 2009a).

Tabela 2 - Área colhida, produtividade e produção de soja no Brasil, Argentina, Estados Unidos e no Mundo nas safras de 2004/05 a 2008/09

País	Safra 04/05	Safra 05/06	Safra 06/07	Safra 07/08	Safra 08/09
Brasil					
Área colhida (ha)	22.800.000	22.229.000	20.700.000	21.300.000	21.600.000
Produtividade (t.ha ⁻¹)	2,32	2,56	2,85	2,86	2,64
Produção (mil t)	53.000	57.000	59.000	61.000	57.000
Estados Unidos					
Área colhida (ha)	36.808.000	36.587.000	36.962.000	36.970.000	35.265.000
Produtividade (t.ha ⁻¹)	2,61	2,61	2,62	2,58	2,53
Produção (mil t)	94.944	95.670	96.843	82.453	89.201
Argentina					
Área colhida (ha)	14.400.000	15.200.000	16.300.000	16.600.000	16.000.000
Produtividade (t.ha ⁻¹)	2,71	2,60	2,99	2,78	2,00
Produção (mil t)	39.000	40.500	48.800	46.200	32.000
Mundo					
Área colhida (ha)	93.180.000	92.920.000	94.240.000	90.720.000	96.290.00
Produtividade (t.ha ⁻¹)	2,32	2,37	2,52	2,44	2,19
Produção (mil t)	215.780	220.670	237.110	221.130	210.840

Fonte: ESTADOS UNIDOS (2009, Tabelas 07-08)

No Brasil, o desenvolvimento de variedades geneticamente adaptadas às diferentes condições de clima, solo e latitude proporcionaram o cultivo desta leguminosa em todas as regiões do país e, em quase todos os estados é explorada. O melhor exemplo desta conquista genética - tornar uma planta original de latitudes elevadas produtiva em médias e baixas latitudes - é o Mato Grosso, hoje maior estado produtor e também detentor da melhor produtividade média. O segundo e o terceiro estados com maiores áreas plantados - Paraná e Rio Grande do Sul - estão na Região Sul onde a soja foi inicialmente cultivada comercialmente. Goiás, Mato Grosso do Sul, Minas

Gerais e Bahia são os demais principais estados produtores. Estes estados juntos detêm 90% da área e da produção brasileira de soja (Tabela 3).

Tabela 3 - Área colhida, produtividade e produção de soja nos principais estados produtores do Brasil nas safras de 2002/03 a 2006/07

Estado	Safra 02/03	Safra 03/04	Safra 04/05	Safra 05/06	Safra 06/07
Mato Grosso					
Área colhida (ha)	4.413.271	5.279.928	6.106.654	5.811.907	5.075.079
Produtividade (t.ha ⁻¹)	2.937	2.758	2.908	2.683	3.009
Produção (mil t)	12.965	14.517	17.761	15.594	15.274
Paraná					
Área colhida (ha)	3.649.119	4.011.021	4.154.667	3.931.721	4.007.323
Produtividade (t.ha ⁻¹)	3.017	2.547	2.284	2.381	2.963
Produção (mil t)	11.009	10.219	9.492	9.362	11.876
Rio Grande do Sul					
Área colhida (ha)	3.591.470	3.968.530	3.733.822	3.863.726	3.890.183
Produtividade (t.ha ⁻¹)	2.667	1.396	654	1.956	2.552
Produção (mil t)	9.579	5.541	2.444	7.559	9.929
Goiás					
Área colhida (ha)	2.176.720	2.591.084	2.663.380	2.492.760	2.168.441
Produtividade (t.ha ⁻¹)	2.903	2.351	2.622	2.414	2.738
Produção (mil t)	6.319	6.091	6.983	6.017	5.937
Mato Grosso do Sul					
Área colhida (ha)	1.411.307	1.796.433	2.025.155	1.903.852	1.718.031
Produtividade (t.ha ⁻¹)	2.898	1.827	1.836	2.181	2.820
Produção (mil t)	4.090	3.282	3.718	4.153	4.846
Minas Gerais					
Área colhida (ha)	885.407	1.086.353	1.188.867	1.005.113	884.982
Produtividade (t.ha ⁻¹)	2.637	2.449	2.625	2.441	2.732
Produção (mil t)	2.335	2.660	2.937	2.453	2.417
Bahia					
Área colhida (ha)	850.000	821.270	870.000	872.600	851.000
Produtividade (t.ha ⁻¹)	1.830	2.880	2.760	2.282	2.700
Produção (mil t)	1.555.500	2.365.290	2.410.872	1.991.400	2.298.000
Outros					
Área colhida (ha)	1.547.475	1.984.371	2.206.329	2.165.670	2.019.567
Produtividade (t.ha ⁻¹)	2.626	2.454	2.467	2.462	2.702
Produção (mil t)	4.063	4.870	5.442	5.331	5.457

Fonte: INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (2003 - 2008)

2.1.3 A produção de óleo de soja no Brasil e no mundo

Os quatro países maiores produtores de óleo e farelo de soja são Estados Unidos, China, Argentina e Brasil. Nas Tabelas 4 e 5 estão as produções de soja, óleo e farelo destes quatro países e o percentual obtido de cada produto, respectivamente. O Brasil é o segundo país em produção de soja, mas é o quarto maior produtor de óleo e farelo. Esta diferença é explicada pelo “mix” exportado no complexo soja: mais soja em grão é direcionada ao mercado externo proporcionalmente ao farelo.

Tabela 4 - Produção e produtividade de óleo e farelo de soja nos Estados Unidos, China, Argentina, Brasil e no Mundo nas safras 2004/05 a 2008/09

País	Safra 04/05	Safra 05/06	Safra 06/07	Safra 07/08	Safra 08/09
Brasil					
Produção de Soja (mil t)	53.000	57.000	59.000	61.000	57.000
Produção de Óleo (mil t)	5.710	5.520	6.050	6.120	5.790
Produção de Farelo (mil t)	23.040	22.280	24.420	24.710	23.400
Estados Unidos					
Produção de Soja (mil t)	85.619	83.507	87.001	72.859	80.749
Produção de Óleo (mil t)	8.782	9.248	9.294	9.335	8.506
Produção de Farelo (mil t)	39.936	37.416	39.037	38.360	35.482
China					
Produção de Soja (mil t)	-	16.350	15.967	14.000	15.500
Consumo de Óleo (mil t)	-	7.607	8.670	9.693	9.486
Consumo de Farelo (mil t)	-	27.776	27.630	30.849	31.673
Argentina					
Produção de Soja (mil t)	39.000	40.500	48.800	46.200	32.000
Produção de Óleo (mil t)	5.558	6.169	6.917	6.139	5.965
Produção de Farelo (mil t)	23.550	25.582	27.856	25.230	24.310
Mundo					
Produção de Soja (mil t)	215.780	220.670	237.110	221.130	210.840
Produção de Óleo (mil t)	-	34.615	36.359	37.554	35.715
Produção de Farelo (mil t)	-	145.816	153.940	158.522	151.351

Fonte: ESTADOS UNIDOS (2009, Tabelas 07-08)

O grão de soja contém entre 17 e 22% de óleo em sua composição (MARCOS FILHO, 1987). Considerando-se toda a produção mundial de soja, 16,21% tornam-se óleo. Explica-se esta diferença por que parte da soja é consumida *in natura* na alimentação humana e animal, apesar do consumo ser preponderantemente industrial.

No Brasil, a produção média de óleo dos últimos cinco anos foi de 10,17% em relação à produção de soja, proporção semelhante aos Estados Unidos, mas inferior à Argentina (14,89%). A China, grande importadora da soja brasileira, produz muito mais farelo e óleo do que seria possível com sua produção interna, em média, 190,77 e 57,36% respectivamente.

Tabela 5 - Porcentagem de óleo produzida sobre a produção de soja no Brasil, Argentina, Estados Unidos, China e no Mundo nas safras de 2004/05 a 2008/09

País	Produto	Safra 04/05	Safra 05/06	Safra 06/07	Safra 07/08	Safra 08/09	Média
Brasil	óleo	10,77	9,68	10,25	10,03	10,15	10,17
	farelo	43,47	39,09	41,39	40,51	41,05	41,06
Estados Unidos	óleo	10,17	10,85	10,74	12,76	10,84	11,03
	farelo	40,92	41,75	42,84	49,61	42,46	43,35
China	óleo	-	46,35	54,3	69,26	61,2	57,36
	farelo	-	169,88	173,04	220,04	204,34	190,77
Argentina	óleo	14,25	15,23	14,17	13,28	18,64	14,89
	farelo	60,38	63,17	57,08	54,61	75,97	61,27
Mundo	óleo	-	15,68	15,33	16,98	16,94	16,21
	farelo	-	66,08	64,92	71,69	71,78	68,52

Fonte: modificado de ESTADOS UNIDOS (2009, Tabelas 07-08)

2.1.4 Importância econômica da produção de óleo no Brasil e no mundo

A oferta de óleo vegetal na safra 07/08 no mundo foi de 127,8 milhões de toneladas. A oferta de óleo de soja representa 29,38% deste total, ou 37,55 milhões de toneladas (Tabela 6).

Os maiores países produtores de óleo vegetal são Indonésia e Malásia, seguidos por China, Comunidade Européia, Estados Unidos, Argentina, Brasil e Índia.

Indonésia e Malásia são predominantemente produtores de óleo de palma. Nos Estados Unidos, Brasil e Argentina predomina a produção de óleo de soja. Os demais países têm produção mais diversificada.

No lado da demanda, os maiores países consumidores são China, Comunidade Européia, Índia e Estados Unidos (Tabela 7). Os maiores países consumidores de óleo de soja são também os maiores produtores da leguminosa: Estados Unidos, Brasil e Argentina mais a China, maior país importador. Segundo ESTADOS UNIDOS (2009cde), o Brasil apresenta o maior consumo

porcentual de óleo de soja sobre o total de óleo vegetal (82,73%), seguido por Argentina, Estados Unidos e China. Considerando os dados de Amaral (2009), este porcentual é um pouco inferior, mas mantém-se superior à média mundial de 29,38% (Tabela 6).

Tabela 6 - Produção de óleo vegetal e de óleo de soja no mundo na safra 2007/2008 em mil toneladas

País	Produção de óleo vegetal total	Produção de óleo de soja	Porcentagem de participação de óleo de soja
Indonésia	20.980	-	-
Malásia	19.730	-	-
China	15.690	7.045	44,90
EU 27	14.280	2.667	18,68
Estados Unidos	10.530	9.335	88,65
Argentina	8.300	6.627	79,84
Índia	7.010	1.458	20,8
Brasil ⁽¹⁾	8.274	6.258	75,63
Mundo	127.800	37.554	29,38

Fonte: ESTADOS UNIDOS (2009, Tabelas 07-08) e ⁽¹⁾ AMARAL, 2009, p. 12

Tabela 7 - Consumo de óleo vegetal e de óleo soja no mundo na safra 2007/2008 em mil toneladas

País	Consumo de óleo vegetal total	Consumo de óleo de soja	Porcentagem de participação de óleo de soja
China	23.340	9.693	41,53
EU 27	22.030	3.377	15,33
Índia	12.940	2.300	17,77
Estados Unidos	12.230	8.317	68,00
Indonésia	5.530	-	-
Malásia	4.890	-	-
Brasil	4.720	3.905	82,73
Paquistão	3.400	-	-
Rússia	3.120	-	-
Japão	2.160	530	24,53
México	2.040	763	37,40
Argentina	1.680	1.265	75,29
Mundo	124.400	37.600	29,99

Fonte: ESTADOS UNIDOS (Tabela 9/FOP 10-11, 2009)

Dentre os cereais e oleaginosas largamente cultivados em todo o mundo como o trigo, o arroz, o milho e o feijão, a soja é aquela que exige mais complexa industrialização e tem menor consumo como alimento *in natura* pela população. O uso na dieta humana quase sempre necessita de processamento industrial para obtenção do óleo, do extrato solúvel (leite de soja) e da proteína.

O principal uso da soja é como fonte de proteína em rações, tanto no Brasil como no mundo, na forma de farelo. O óleo resultante do processamento do farelo é usado também na alimentação animal para elevar o teor energético, melhorar a palatabilidade e para reduzir a presença de pó nas rações, mas este uso é pequeno quando comparado ao volume de farelo. Usa-se o óleo preponderante na alimentação humana, no preparo de frituras ou industrializado na forma de margarina, por exemplo. Também se usa, em escala menor, o extrato solúvel e a proteína, o primeiro no preparo de queijo de soja ou como bebida em substituição ao leite animal e, a segunda em dietas ricas em aminoácidos.

Atualmente, o óleo de soja ganha importância como fonte alternativa de combustível renovável, em substituição ao diesel fóssil, após passar por processo de transesterificação ou esterificação. Esta demanda no Brasil foi gerada pela Lei nº 11.097/2005 e pela Resolução nº 2, de 27 de abril de 2009, do Conselho Nacional de Política Energética – CNPE, as quais determinam o percentual de mistura de biodiesel ao diesel. A lei determina 2% de biodiesel em mistura obrigatória ao diesel convencional a partir de 2008 e 5% a partir de 2013 (BRASIL, 2009).

Esta resolução do CNPE elevou esse percentual para 4% a partir de julho de 2009. Percentual maior - de até 5% - é permitido, a viabilidade deste aumento depende dos preços do petróleo e das matérias-primas para fabricação de biodiesel.

Segundo a Amaral (2009), em 2008 cerca de um milhão de toneladas de biodiesel foram consumidas e, este volume deve atingir 1,3 milhões de toneladas em 2009.

A meta para 2020 é a produção de 3,1 milhões de toneladas de biodiesel.

2.1.5 Estrutura do mercado no Brasil

A Tabela 8 mostra a importância da soja na produção de óleos vegetais e gorduras no Brasil. Na safra 2007/08, o óleo de soja representou 73,3% da disponibilidade de óleos e gorduras para diferentes finalidades inclusive para a produção de biodiesel.

A meta para 2020 é de 3,3 bilhões de litros de biodiesel, equivalente a 3,3 bilhões de litros de óleo vegetal. Segundo Amaral (2009), 70 a 80% do biodiesel provêm da soja e, portanto, da meta para 2020, entre 2,31 e 2,64 x 10⁹ L equivaleriam a óleo desta oleaginosa.

Tabela 8 - Participação (%) e disponibilidade de óleos vegetais e gorduras animais (em mil toneladas) no Brasil na safra 2007/08

Produto	Produção	Importação	Oferta	Participação
Óleo de soja	6.528	90	6.348	73,3
Sebo e gordura animal	598	6	604	7,0
Banha de porco	394	-	394	4,6
Óleo de palma	215	143	358	4,1
Óleo de algodão	278	-	278	3,2
Óleo de girassol	50	20	70	0,8
Óleo de colza	59	9	68	0,8
Óleo de mamona	56	8	64	0,7
Outros óleos vegetais	366	106	472	5,5
Total	8.274	382	8.656	100,0

Fonte: AMARAL, 2009, p. 12

2.2 Ecofisiologia da produção de soja

2.2.1 Índice de área foliar

A eficiente utilização da radiação por uma cultura requer a máxima absorção da radiação fotossinteticamente ativa (RFA) pelos tecidos fotossintetizantes. Neste contexto, as folhas constituem-se nos principais órgãos. Portanto, o rápido estabelecimento e a manutenção de um ótimo índice de área foliar (IAF) são importantes para maximizar a interceptação da RFA e conseqüentemente, a fotossíntese no dossel (RODRIGUES et al., 2001).

O grau de interceptação de luz e a sua transformação em matéria seca dependem de características geométricas e ópticas do dossel da cultura, as quais variam com o desenvolvimento e o estágio fenológico (LÖVENSTEIN et al., 1995). A interceptação de luz pelo dossel da cultura aumenta até um determinado valor crítico (IAF crítico), onde a interceptação da RFA torna-se máxima. Na cultura da soja, este valor está entre 3,5 e 4,0, quando se encontra no estágio R₁ (BOARD; HARVILLE, 1992). Atingido o IAF crítico, a taxa de assimilação bruta estabiliza-se e taxa de crescimento torna-se constante (LÖVENSTEIN et al., 1995).

O IAF em um determinado período de tempo é função do número de folhas por unidade de área, da área de cada folha e de seu tempo de vida. E o número de folhas por unidade de área é função do número de folhas por planta e do número de plantas por unidade de área. A área total de folhas da planta e a duração da área foliar respondem pelo incremento de carbono na planta de

soja com a mesma significância que a taxa de troca de CO₂ (TTC) das folhas individualmente (BEGONIA et al., 1987). A simulação do acúmulo de biomassa e da transpiração necessita da simulação do IAF. A formação de uma nova folha, ou da área foliar em determinado período, depende da biomassa acumulada anteriormente pela planta (SETIYONO et al., 2008).

O reflexo da perda de biomassa na produtividade da soja depende de quando, quanto e com que intensidade esta ocorreu. Perda de biomassa na fase vegetativa influi menos na produtividade que na fase reprodutiva porque, na primeira fase, o desenvolvimento de novas folhas compensa a redução temporária da capacidade assimilatória (SINGER et al., 2004).

Singer et al. (2004) após 4 anos de ensaios onde eliminaram 30% da altura média de plantas de soja em diferentes estádios, obtiveram duas fórmulas (linear e exponencial) com alto R² correlacionando a diferença de produtividade com a diferença de densidade de vagens das parcelas podadas em relação à parcela testemunha.

2.2.2 Radiação solar

Não havendo limitações na disponibilidade hídrica, na fertilidade e no controle de pragas, doenças e plantas daninhas, a produção de fitomassa dependerá exclusivamente da radiação solar disponível para a fotossíntese. Um dos fatores que mais limitam o crescimento e desenvolvimento das plantas é a radiação solar (TAIZ; ZIEGER, 2004).

A radiação solar pode ser classificada em duas fases: (i) direta, quando não há interferências em atingir a superfície da Terra, e (ii) difusa, quando a radiação é refletida ou espalhada por nuvens e pela atmosfera (GOUDRIAAN; VAN LAAR, 1994). Estas fases têm comprimentos de onda distintos: a direta é de baixo comprimento de onda (inferior a 3.000 nm) e a segunda é a radiação térmica (superior a 3.000 nm). O espectro da radiação de baixo comprimento de onda inclui a faixa de radiação visível (entre 400 e 700 nm), que é particularmente importante devido ser a radiação fotossinteticamente ativa (RFA) (KUBINS, 1971).

Somando a radiação difusa e direta em proporções apropriadas, a razão entre a RFA e a radiação solar é próxima de 0,5 (SINCLAIR; MUCHOW, 1999). Segundo Lövenstein et al.

(1995), 80% da RFA incidente é absorvida, sendo 10% perdida por reflexão e 10% por transmissão pelas folhas.

A interceptação de radiação solar é uma função do índice de área foliar (IAF) e do coeficiente de extinção luminosa (k) (PENGELLY et al., 1999). A fração de radiação extinta ao longo do dossel vegetativo, devido à menor transmissividade luminosa é definida pelo coeficiente de extinção luminosa. A relação entre k e a penetração de luz no dossel é inversamente proporcional. À medida que se adentra no dossel, ocorre um aumento do auto-sombreamento, a penetração da luz diminui e crescem os valores de k (CASAROLI et al., 2007). Desta forma, a intensidade da luz a certa profundidade no dossel pode atingir valores abaixo do ponto de compensação luminoso, o balanço carbônico torna-se negativo: nas folhas desta profundidade a respiração excede a assimilação bruta de CO_2 (LÖVENSTEIN et al., 1995).

Havendo incremento no IAF também há aumento na interceptação de radiação, mas só até um determinado valor que ocorre com o fechamento completo do dossel. As folhas começaram a sombrear-se umas às outras, até atingir o IAF crítico, quando novas áreas foliares não resultam em aumento na quantidade de luz interceptada.

A RFA interceptada e a eficiência de uso desta na fotossíntese pela cultura determinam o total de fitomassa seca produzida pela soja (SHIBLES, WEBER; 1965), mas altas intensidades de radiação solar absorvidas pelas plantas podem levá-las a saturação luminosa diminuindo a eficiência no uso da radiação (EUR, g.MJ^{-1}) (JIANG et al., 2004; ADAMS; ADAMS, 1992 apud CORRÊA, 2008). A fotossíntese, a elongação da haste principal e ramificações, a expansão foliar, o pegamento de vagens e grãos e a fixação biológica são dependentes da radiação solar na cultura da soja (CÂMARA, 1991).

EUR é a eficiência com a qual a radiação interceptada (ou absorvida) é convertida em biomassa (SINCLAIR; HORIE, 1989).

2.2.3 Temperatura do ar

Os dois fatores abióticos dominantes a influenciar a fenologia da soja são a temperatura do ar e o fotoperíodo (HESKETH et al., 1973; SUMMERFIELD; WILCOX, 1978 apud SETIYONO

et al., 2007; CREGAN; HARTWIG, 1984). A temperatura geralmente influencia positivamente a taxa de desenvolvimento da cultura (SETIYONO et al., 2007).

Os modelos de desenvolvimento da soja assumem que a taxa de desenvolvimento é linear acima de uma dada temperatura - denominada temperatura basal - e abaixo de uma dada temperatura máxima (SETIYONO et al., 2007), esta também denominada temperatura basal superior. Na cultura de soja, a temperatura basal de 10°C é considerada correta (GARNER; ALLARD, 1930). Temperaturas acima de 40°C inibem o desenvolvimento, provocam abortamento de flores e prejudicam a retenção de vagens e temperaturas abaixo de 10°C prejudicam o desenvolvimento da cultura (EMBRAPA, 2007b). Um platô representa a máxima taxa de desenvolvimento da cultura dada uma temperatura ótima (SETIYONO et al., 2007). Temperaturas entre 20-30°C otimizam o crescimento e desenvolvimento da cultura de soja (HESKETH et al., 1973). Hofstra (1972), na temperatura diurna/noturna de 27/22°C, obteve a máxima taxa de crescimento do IAF nos primeiros estágios de desenvolvimento (folhas primária, primeira e segunda trifoliadas), taxa esta o dobro das demais utilizadas no experimento. Neste mesmo ensaio, as mais altas taxas de crescimento de matéria seca ocorreram entre as temperaturas de 27/22°C e 36/31°C, como também a formação de novas folhas (Tabela 9).

Tabela 9 - Número médio de dias para o surgimento de um novo trifólio em diferentes temperaturas

Temperatura (°C)	Dias	Temperatura (°C)	Dias
18/13	5,0	30/25	2,6
21/16	4,4	33/28	2,6
24/19	3,4	36/31	2,7
27/22	2,6	-	-

Fonte: HOFSTRA, 1972, p. 540

Nota: Adaptado pelo autor

Considerando uma amplitude mais restrita, entre 24 e 30°C, a taxa de preenchimento da vagem pela semente é aumentada nesta faixa de temperatura (THOMAS; RAPER, 1976; SHIBLES et al., 1975; GRIMM et al., 1993; MAYERS et al., 1991) e, entre 25 e 30°C, é a faixa de temperatura ótima do ar para assimilação de CO₂ (Figura 01) (JEFFERS; SHIBLES, 1969).

A temperatura afeta a cultura da soja tanto na sua taxa de crescimento como na partição de fotoassimilados. O crescimento e desenvolvimento da soja tido como ideal ocorre na faixa de temperatura entre 20 e 30°C (HOFSTRA, 1972; HESKETH et al., 1973; EMBRAPA, 2007b). Heinemann et al. (2006), em estudo conduzido sob três regimes de temperatura diurna e noturna

(20/15°C; 25/20°C e 30/25°C) e duas concentrações de CO₂, mas com fotoperíodo fixo de 12 horas e abaixo do fotoperíodo crítico, verificaram que o número de dias até R1 é mais afetado pela temperatura que pela concentração de CO₂. Maiores temperaturas reduziram o período entre a germinação e o florescimento, fato que os autores explicam como efeito da temperatura noturna. A área foliar específica reduziu-se com o aumento da temperatura.

A variedade (MARCOS FILHO, 1987) e o tipo de crescimento (YAKLICH et al., 2002) influem nos teores de óleo e proteína, mas as condições ambientais também exercem efeito. Há correlação negativa entre o teor de óleo e de proteína, podendo este teor sofrer influência das condições climáticas (MARCOS FILHO, 1987). A composição de proteína e óleo nos grãos é alterada conforme a temperatura nos estádios R₅ a R₈ (GIBSON; MULLEN, 1996). Aumento da concentração de óleo em detrimento da concentração de proteína ocorre quando altas temperaturas ocorrem entre R₅ e R₆ (DORNBOS; MULLEN, 1992). Wilcox e Cavins (1992) concluíram que temperaturas 20 a 40 dias antes da maturação são determinantes na composição dos grãos.

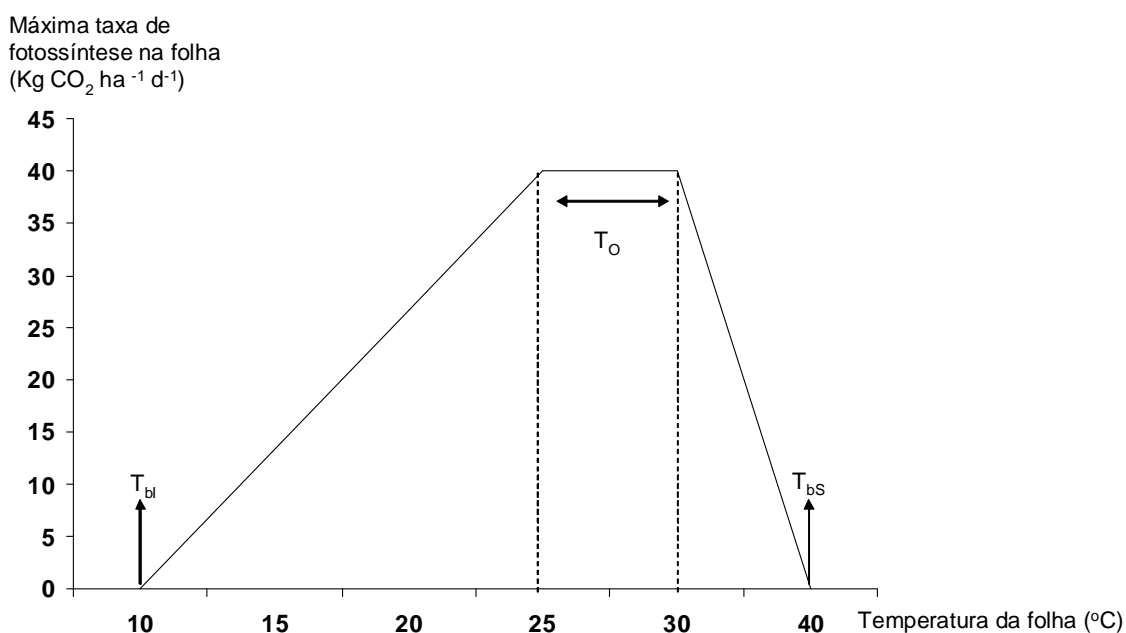


Figura 1 - Máxima taxa de fotossíntese na folha (kg. ha⁻¹.dia⁻¹ de CO₂) em função da temperatura da folha (T_{bl} : temperatura basal inferior - 10°C e T_{bs} : temperatura basal superior - 40°C) com a adição de uma faixa de variação para a temperatura ótima (T_o , °C). Adaptado de PENNING DE VRIES et al., 1989, p. 34

Atrasos na semeadura foram citados para explicar incrementos nos teores de proteína nos grãos (KANE et al., 1997; HELMS et al., 1990 apud BASTIDAS et al., 2008). Bastidas et al.

(2008) não encontraram relação entre os teores de proteína e óleo e datas de semeadura em experimento conduzido em dois anos com diferenças climáticas. Robinson et al. (2009) foram mais minuciosos e verificaram que nas condições de Indiana (Estados Unidos), a data de semeadura altera a composição dos grãos, mas o principal motivo seria a variação da temperatura no estágio R₆. Quando a temperatura média neste estágio era máxima, devido à semeadura ter sido efetuada cedo, maiores concentrações de óleo e melhores produtividades foram alcançadas. Semeaduras tardias resultaram em maiores teores de proteína e menores produtividades.

2.2.4 Fotoperíodo

O tempo em horas entre o nascer e o pôr do sol é denominado fotoperíodo (GOUDRIAAN; VAN LAAR, 1994) e é função da latitude local (HARTWIG, 1973) (Figura 2).

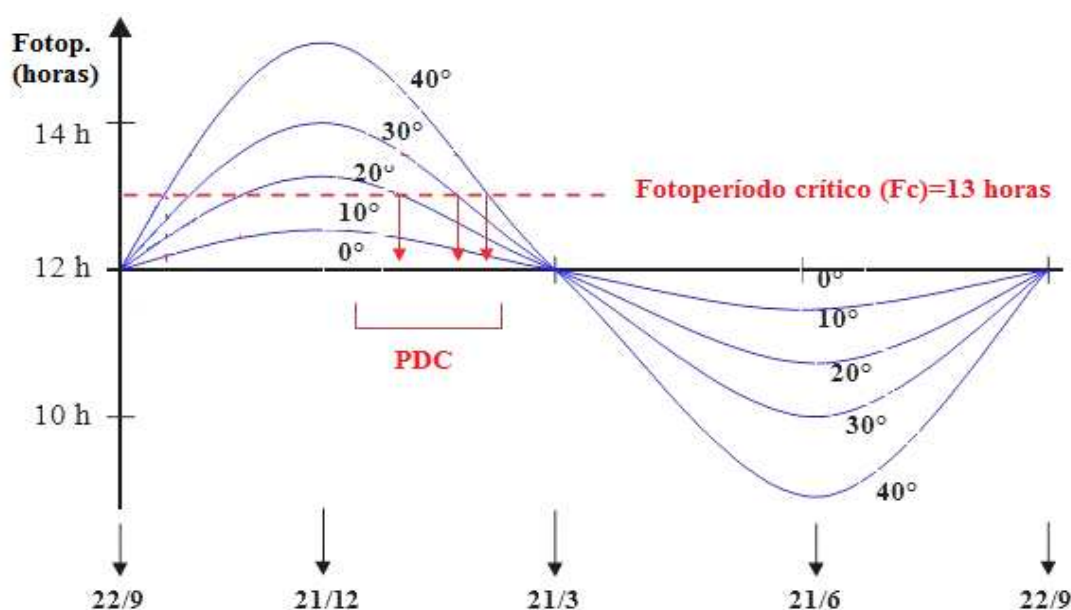


Figura 2 - Variação no fotoperíodo em diferentes latitudes, e as respectivas datas de indução floral para planta de dias curtos (PDC). Fonte: CORRÊA, 2008, p. 32

A soja é uma planta de “dia curto” e, o fotoperíodo, modifica a resposta da cultura à temperatura. Dias longos reduzem a taxa de desenvolvimento, por atrasar a idade reprodutiva

(SETIYONO et al., 2007). O fotoperíodo é o principal fator influenciador na definição do ciclo entre a data de emergência até a data de maturação.

Semeaduras no início da estação recomendada estimulam uma iniciação precoce do R_5 e alongam o período entre R_5 e R_6 (BASTIDAS et al., 2008; WILCOX; FRANKENBERGER, 1987). Cultivares de hábito de crescimento indeterminado são utilizados no início da estação recomendada para realização da semeadura por apresentarem maior número de nós por planta (WILCOX; FRANKENBERGER, 1987), bem como mais vagens e sementes (PEDERSEN; LAUER, 2004).

Robinson et al. (2009) verificaram que atrasos nas datas de semeadura reduziram principalmente o número de vagens por m^2 . Semeaduras no início da estação recomendada resultaram em maior número de nós por planta e maior número de vagens por nó. As variações no número de grãos por vagem pouco impactaram no rendimento de grãos. Nas semeaduras mais tardias, o aumento na massa dos grãos não compensou a redução do número de vagens por m^2 e o número de sementes por vagem.

2.2.5 Nitrogênio e dióxido de carbono

A Figura 3 representa a assimilação bruta de CO_2 por uma cultura de trigo. A curva 1 da Figura 3 representa o máximo que uma cultura com alto IAF, saudável e verde poderia absorver de CO_2 durante a estação de crescimento, em condições de Wageningen, Holanda. Como as culturas não cobrem toda a área plantada durante todo o ciclo e como há redução da assimilação de CO_2 durante a maturação, a curva 2 representa o montante de CO_2 assimilado sob estas condições. A curva 3 representa a assimilação bruta de CO_2 e também a potencial taxa de crescimento (LÖVENSTEIN et al., 1995).

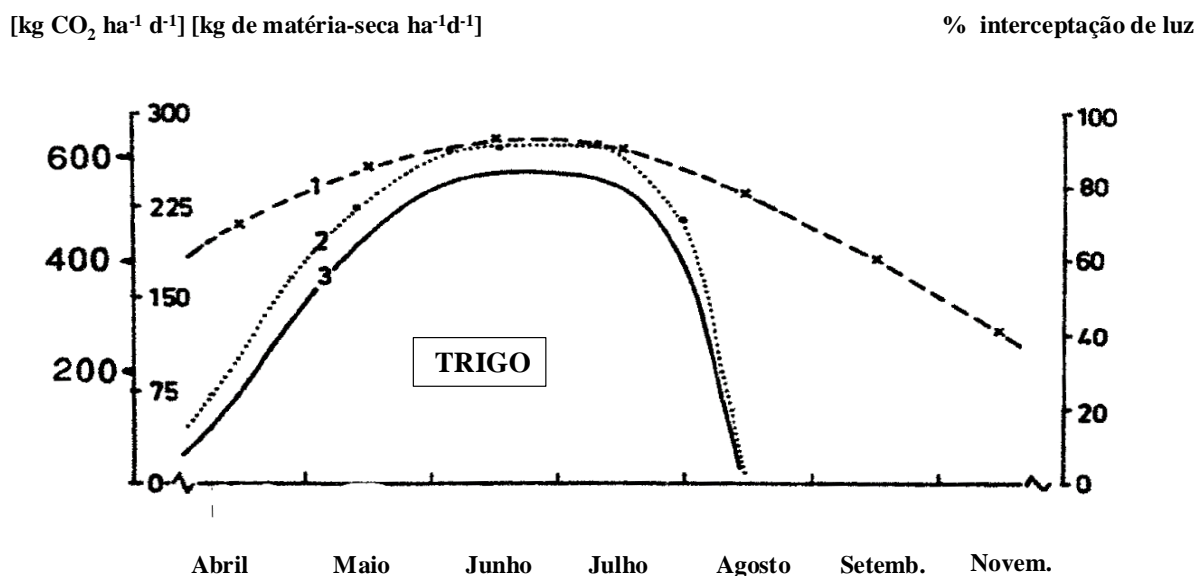


Figura 3 - Distribuição sazonal da assimilação bruta de CO_2 por uma cultura de trigo fechada e verde (curva 1), porcentagem de luz interceptada pela cultura (curva 2) e taxa de crescimento potencial da cultura (curva 3) Fonte: Adaptado de LÖVENSTEIN et al., 1995, p. 35

A assimilação de CO_2 é limitada pela disponibilidade de nitrogênio. O uso de atmosfera controlada com concentrações de CO_2 crescentes é importante para a identificação da partição de CO_2 e nitrogênio, e ajuda a identificar onde ocorre o acúmulo de fotoassimilados (AINSWORTH et al., 2007). Nielsen e Stitt (2001) estudaram folhas de tabaco em desenvolvimento e identificaram que os primeiros fotoassimilados eram predominantemente carboidratos, os últimos fotoassimilados formaram aminoácidos, proteínas e material de parede celular. Alta demanda de CO_2 é exigida por folhas em crescimento em relação ao N, comparando às folhas maduras (FOYER; NOCTOR, 2002 apud AINSWORTH et al., 2007). Heinemann et al. (2006) verificaram que a partir do estágio R_6 há um acréscimo em β para a concentração ambiente de CO_2 (400 ppm) e um decréscimo em β para a concentração alta de CO_2 usada neste ensaio (700 ppm) devido às limitações bioquímicas.

Em ambiente com concentrações elevadas de CO_2 , Ainsworth et al. (2007) verificaram que a taxa de fotossíntese da soja cresce em folhas totalmente desenvolvidas e a condutância dos estômatos decresce tanto em folhas jovens como maduras com o aumento do teor de CO_2 . Verificaram também que o teor de carboidratos era alto em folhas maduras e este cresceu com o

aumento do CO₂, mas em folhas jovens este teor era baixo e não foi afetado pelo aumento de CO₂. O comportamento dos aminoácidos avaliado foi o oposto: baixo e sem resposta ao aumento do CO₂ em folhas maduras e alto em folhas jovens. Os teores de C total, hexoses, sacarose e amido em folhas maduras elevaram-se com o incremento de CO₂, mas os teores de nitrogênio, uréia e aminoácidos não tiveram o mesmo comportamento, causando elevação da relação C: N.

Folhas em desenvolvimento possuem mais CO₂ intercelular e menores níveis de clorofila que folhas maduras. Aumento de CO₂ não alterou o teor de clorofila tanto em folhas jovens quanto em maduras.

Em um experimento onde ¹⁴C foi introduzido e a partição deste ¹⁴C em fotoassimilados analisada, OKAZAKI et al. (2005) verificaram que em folhas de soja houve maior acúmulo de amido que sacarose e, em folhas de arroz, o inverso ocorreu. Esses autores, no mesmo experimento, também avaliaram a partição de CO₂ com ¹⁴C em atmosfera com apenas 2% de O₂. Nestas condições, as folhas de soja acumularam mais amido que em condições normais, indicando que redução da fotorrespiração leva a um aumento do acúmulo de amido.

2.2.6 Água

A cultura da soja utiliza entre 450 e 800 mm de chuva, esta variação está relacionada à duração do ciclo da variedade (precoce, média ou tardia), às condições de clima (umidade relativa, temperatura média, fotoperíodo) e ao manejo da cultura (semeadura direta ou convencional, profundidade de exploração do solo pelas raízes, p.e.). Considerando-se a exigência hídrica de 7-8 mm diários durante a fase crítica de floração e enchimento de grãos (R1 a R6), aproximadamente 120-300 mm são necessários nesta fase, conforme o ciclo do cultivar (EMBRAPA, 2003, 2007b).

Durante o início da formação de vagens, o estresse hídrico prejudica a produtividade, reduzindo o número de sementes. Quando o estresse hídrico ocorre após a definição do número de sementes (fase de acúmulo de matéria seca), a massa destas é comprometida (Tabela 10) (SIONIT; KRAMER, 1977 apud MARCOS FILHO, 1987).

Inamullah e Isoda (2005) estudaram o efeito de crescentes estresses hídricos nas culturas da soja e do algodão, e constataram que a queda na taxa de assimilação de CO₂, o aumento na temperatura das folhas, a queda no rendimento do PSII (Fv/Fm), o aumento da dissipação de calor

e a queda na taxa de clorofila foram mais acentuadas na cultura da soja. Constataram também que a taxa de assimilação de CO₂ foi menor no meio do dia do que na manhã ou tarde, indicando estresse por luz ou calor em ambas as culturas, mas a soja sofrendo mais em condições de menor umidade.

Tabela 10 - Efeitos de deficiências hídricas, em diferentes estádios reprodutivos, sobre componentes de produção de soja (SIONIT; KRAMER, 1977 apud MARCOS FILHO, 1987)

Deficiência hídrica (período)	Vagens (número)	Sementes (número)	Sementes (gramas)
Indução do florescimento	86,2 A	187,0 B	34,4 B
Pleno florescimento (R2)	92,6 A	204,8 B	36,4 B
Início da frutificação (R3)	82,2 A	155,0 C	27,6 C
Plena frutificação (R5/R7)	91,8 A	244,8 A	29,7 C
Testemunha	95,4 A	243,2 A	40,9 A

Nota: Adaptado pelo autor

A relação Fv/Fm é mais alta na soja que no algodão, mas, sob estresse hídrico, a queda no rendimento é maior na soja, sugerindo que o aparato fotossintético é mais prejudicado nesta cultura. Sob estresse hídrico, a dissipação térmica do excesso de energia é bastante acentuada na soja, indicando auto-regulação da atividade do PSII, através do aumento da concentração de xantoxila para dissipar o excesso de energia na forma de calor. A foto inibição ao meio do dia é um mecanismo de proteção reversível, induzido pela inativação do PSII e incremento da dissipação de energia térmica (HUANG et al., 2006)

2.2.7 Fenologia

A fenologia das culturas é caracterizada por estádios. Nesta caracterização utilizam-se escalas e a mais adotada na cultura da soja foi desenvolvida por Fehr e Caviness (1977), a qual é dividida em duas fases principais (caracterizadas por diferentes estádios): a fase vegetativa (estádio denominado V) e a reprodutiva (estádio denominado R). No caso de cultura, é considerado atingido um estágio de desenvolvimento quando 50% das plantas se encontram no estágio fenológico em questão.

O desenvolvimento vegetativo inicia na emergência, quando os cotilédones aparecem sobre a superfície do solo, e finaliza com o aparecimento da primeira flor. Os nós referentes a

cada par de folhas desenvolvidas da haste principal são numerados em seqüência, iniciando-se quando o primeiro par de folhas cotilédones está aberto e a folha unifoliada expandida (estádio V_C). Quando o primeiro par de folhas unifoliadas está completamente desenvolvido e a folha no nó acima está acabando de se expandir, atinge-se o estágio V_1 . Essa sucessão ocorre até surgir a primeira flor, quando inicia a fase reprodutiva.

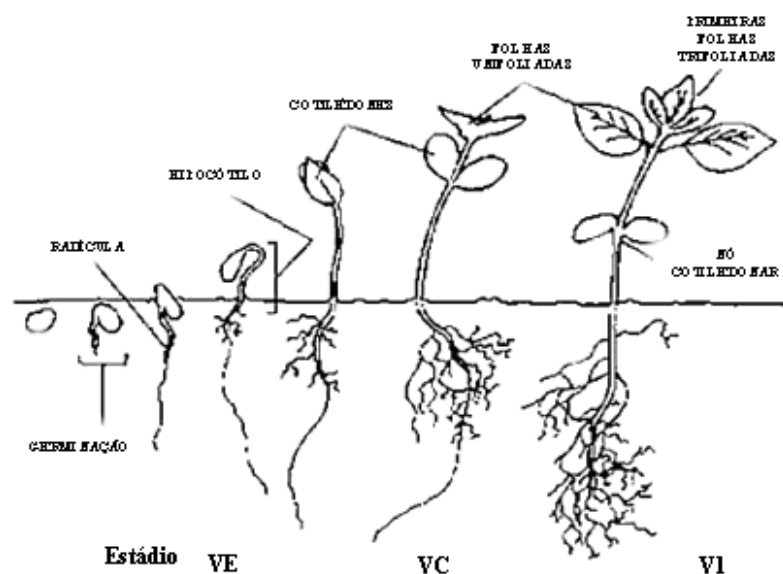


Figura 4 - Estádios de desenvolvimento da cultura de soja durante o período juvenil: Estádio VE – emergência dos cotilédones; VC – cotilédones desenvolvidos e folhas unifoliadas expandidas; V1 – folhas unifoliadas completamente desenvolvidas e folhas trifoliadas superiores desenroladas. Fonte: Adaptado de Universidade de Michigan (2005)

Em variedades de hábito de crescimento indeterminado, mesmo após o início da floração, o meristema apical não cessa a divisão celular e mais folhas e nós se desenvolvem. Neste caso, a escala de Fehr e Caviness (1977) privilegia a fase reprodutiva. A fase R_1 inicia a fase reprodutiva, e surge com o primeiro botão floral aberto na haste principal. Na fase R_2 é atingido o florescimento pleno e a fase R_3 é atingida quando uma vagem de ao menos 5 mm surge em um dos quatro primeiros nós da haste principal. A fase $R_{3.5}$ é aquela onde o desenvolvimento da haste e da folha cessa na maioria dos cultivares de hábito de crescimento indeterminado (SETYONO et al., 2007). O estágio R_4 marca o início do período mais crítico de desenvolvimento da planta quanto à determinação do rendimento em sementes. O estresse nessa fase não pode ser recuperado e resulta em uma maior perda de produtividade que em qualquer outro momento (CÂMARA,

1998 apud CORRÊA, 2008). Quando sementes com no mínimo três mm surgem em um dos quatro primeiros nós da haste principal, marcam o início do estágio R₅. Neste estágio é atingido o máximo valor de matéria seca (BOARD; MODALI, 2005 apud BOARD; MARICHERLA, 2008). Estes primeiros vinte dias após o surgimento das sementes nas vagens (R₅) são importantes na acumulação de matéria seca e na produtividade da soja (SHIRAIWA et al., 2004; NAKAJIMA et al., 2006 apud TANAKA et al., 2008). R₆ é atingido quando as sementes dentro das vagens apresentam largura igual à da cavidade da vagem. A maturidade fisiológica (R₇) indica o fim da fase reprodutiva e surge quando uma vagem marrom aparece na haste principal em qualquer nó. Quando 95% das vagens tornam-se marrons atinge-se R₈ ou maturidade completa.

A sensibilidade da cultura de soja na fase reprodutiva é maior que na fase vegetativa. Qualquer estresse que prejudique a fotossíntese na fase reprodutiva tem efeito na produtividade e na composição de óleo e proteína nos grãos. O período entre os estádios R₅ e R₆ são críticos na determinação da produtividade. Estresses nesse período significam menos vagens por m² e baixa produtividade (FOROUD et al., 1993). Em experimento conduzido por Proulx e Naeve (2009), pode-se confrontar o resultado da redução da fotossíntese devido à perda de área foliar (desfolha) com a redução da fotossíntese devido ao sombreamento durante o período de enchimento de grãos. Efeitos semelhantes ocorreram nos componentes da produtividade - rendimento, tamanho e massa de sementes - quando houve perda de área foliar ou sombreamento, mas os efeitos foram muito diferentes nos teores de proteína e óleo dos grãos submetidos a estes tratamentos (PROULX; NAEVE, 2009). Isto se explica porque durante a senescência um importante montante do nitrogênio é remobilizado de outros órgãos (JEPPSON et al., 1978; ZEIHHER et al., 1982; STASWICK, 1994; apud PROULX; NAEVE, 2009) e, no tratamento sob desfolha, isto não ocorre, reduzindo os teores de proteína nos grãos comparativamente ao de óleo. Segundo Zeiher et al. (1982), de 30 a 100% do nitrogênio é remobilizado.

Portanto, estresses que ocorram na fase reprodutiva promoverão prejuízos na produtividade, mas com efeitos distintos na composição de óleo e proteínas dos grãos: (i) aqueles prejudiciais devido à desfolha, tais como ataque de pragas ou doenças e, (ii) aqueles que não promovam desfolha mas prejudicam a fotossíntese, tais como dias nublados ou veranicos.

2.3 Modelagem da produção

2.3.1 O modelo LINTUL

Um modelo é uma descrição de uma cultura, usado para estudar seu crescimento e suas respostas em relação ao ambiente. Modelos de simulação de crescimento de culturas descrevem o crescimento e desenvolvimento de uma dada cultura e sua interação com o solo, o clima e o manejo (adubação, irrigação).

A função de um modelo de crescimento de culturas é reduzir o custo da pesquisa agrícola e o tempo para realização de um experimento de campo, racionalizando o uso de recursos. Desde os primórdios da Ciência, o conceito de experimentação baseia-se na possibilidade de repetição de resultados e, muitas vezes, o tempo para condução de um número elevado de ensaios mais o custo de instalação, manutenção e obtenção de dados tornam-se limitantes para uma correta obtenção desta repetibilidade. Obtido um modelo, este pode ser aferido com ensaios a campo e repetido para diversos locais, permitindo a previsão de resultados como o monitoramento do desenvolvimento de uma cultura com a estimativa da respectiva safra e a caracterização do potencial produtivo, conforme a localização das lavouras, considerando as restrições ambientais de solo e clima.

O modelo LINTUL (Light Interception and Utilization) surgiu de uma simplificação do SUCROS (Simple and Universal CROp growth Simulator). O SUCROS, onde a abordagem da fotossíntese era incluída, foi simplificado, incorporando apenas os processos determinantes que afetam o crescimento das culturas. O modelo LINTUL, desenvolvido inicialmente para a cultura da batata como forma de prever o acúmulo de matéria seca baseado na aproximação da eficiência do uso da radiação (EUR), foi adaptado para diversas culturas (CORRÊA, 2008).

No modelo LINTUL, relações lineares entre a produção de biomassa (matéria seca) e a quantidade de radiação interceptada sob condições ótimas de desenvolvimento, determinam a produção de matéria seca da cultura (MONTEITH, 1972). O total de biomassa formado é dividido pelos órgãos vegetais: raízes, hastes, folhas e órgãos de armazenamento (SPITTERS, 1990), usando frações de alocação definidas em função do estágio de desenvolvimento fenológico da cultura. Os pesos secos dos órgãos da planta são obtidos pela integração de suas taxas de crescimento ao longo do tempo (CORRÊA, 2008).

Como a simulação é diária, o modelo necessita dos seguintes dados básicos: temperaturas média, máxima e mínima do ar e radiação global (escala diária), da latitude do local e da época de semeadura.

Corrêa (2008) procedeu às seguintes adaptações para a cultura da soja em versão do modelo LINTUL anteriormente usado na cultura do trigo irrigado: (i) sensibilidade ao fotoperíodo - foi introduzida uma função de platô linear para cálculo da sensibilidade ao fotoperíodo, durante o período entre V1 e a antese; (ii) o uso de uma função da temperatura - linha de três segmentos lineares - para calcular o aumento diário na soma térmica e, conseqüentemente, o estágio de desenvolvimento; (iii) a introdução de um montante de temperatura mínimo para emergência - a emergência da cultura ocorre quando o somatório de graus-dia alcança um valor mínimo conhecido para emergência e não mais é função do tempo; (iv) o peso inicial das raízes na emergência não é mais tido como zero. A radícula começa a se estender para baixo dentro de 24-48 horas após a semeadura, e quando os cotilédones emergem, seu peso é aproximadamente 25% do peso total das novas folhas; (v) a resposta do modelo pode ser visualizada tanto como graus-dia quanto em estágio de desenvolvimento; e (vi) a senescência das folhas devido ao envelhecimento é expressa em função do estágio de desenvolvimento, e não mais relacionada à taxa de mortalidade.

2.3.2 Produtividade potencial de grãos e de óleo

Na cultura da soja, considerando condições ótimas de disponibilidade hídrica, fertilidade e controle de pragas, doenças e plantas daninhas; a produtividade potencial de grãos e de óleo será, no contexto deste trabalho, função da radiação solar e das temperaturas máximas e mínimas incidentes acima da temperatura basal, conforme a data e local (latitude) de semeadura (mutáveis ano a ano seguindo o clima preponderante na safra); e da partição de fotoassimilados característica da cultura para os órgãos de armazenamento. “Produtividade potencial é definida como a produção total de matéria seca por uma cultura verde e saudável, determinada inteiramente pelo montante de luz disponível, de acordo com as temperaturas prevalecentes e características da cultura” (LÖVENSTEIN et al., 1995).

Yamada (1982) estimou a produção máxima teórica de grãos para a cultura de soja de 11000 kg por hectare em condições brasileiras. Seiter et al. (2004) relataram produtividades de matéria seca de até 13900 kg por hectare, o que representa produtividade de grãos próximo de 7000 kg por hectare, considerando um índice de colheita de 50%. Segundo Cooper (2003), já foram registradas produtividades obtidas por agricultores de 6000 a 6700 kg por hectare na década de 60.

A produtividade potencial de óleo, dada uma produtividade potencial de grãos, é então dependente do seu teor na semente. A soja pode conter entre 17 e 22% de óleo (MARCOS FILHO, 1987), mas considerando os dados de Amaral (2010) sobre o processamento de soja e obtenção de óleo no Brasil, o teor médio encontrado em nossas condições é cerca de 19%.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 O modelo

Devido às complexas interações entre clima, solo e planta, modelos foram concebidos visando representar e simplificar a realidade, organizando equações que quantificam suposições e hipóteses idealizadas do sistema real (THORNLEY, 1976 apud MARTIN, 2007).

Para a obtenção de estimativas de produção de óleo de soja, utilizou-se o modelo PPDSO (Produtividade Potencial e Deplecionada de Soja e Óleo) baseado no modelo LINTUL. Uma visualização deste modelo está na Figura 5.

Incorporado a este modelo estão ferramentas estatísticas para melhor determinar a produtividade de grãos e óleo conforme a variabilidade dos dados climáticos. Estas ferramentas geraram valores aleatórios de temperatura, tendo como limite inferior a mínima temperatura mínima (mT_m , °C) da série histórica e limite superior o máximo valor de temperatura máxima (MT_M , °C). Esta aleatorização foi simulada mil vezes para cada dia do ciclo produtivo.

Neste estudo, o modelo PPDSO tem como entradas os dados climáticos diários: radiação global (Q_g) e temperaturas máxima (T_M), mínima (T_m) e média (mT). A produtividade potencial de óleo é então calculada com estes dados climáticos diários a partir da data de semeadura (em dia Juliano), também dado de entrada. Os demais dados de entrada são: desvio padrão referente à temperatura média (sT), temperatura basal (T_b), valores críticos de desenvolvimento relativo (Dr) e de partição de carboidrato (p), coeficiente de extinção de radiação (k), eficiência de utilização de radiação (EUR), área foliar específica (A_{Fe}), índice de colheita (IC) e teor de água (u) e de óleo (To) no grão. O ciclo da cultura é dimensionado conforme montante de graus-dia necessários à conclusão do ciclo. Os parâmetros de desenvolvimento da soja estão na Tabela 11 e serão descritos ao longo deste capítulo.

Os demais elementos de clima como precipitação ou irrigação, umidade relativa do ar e evapotranspiração atual são considerados como ótimos, assim como o fornecimento de nutrientes e o controle de pragas, doenças e plantas daninhas.

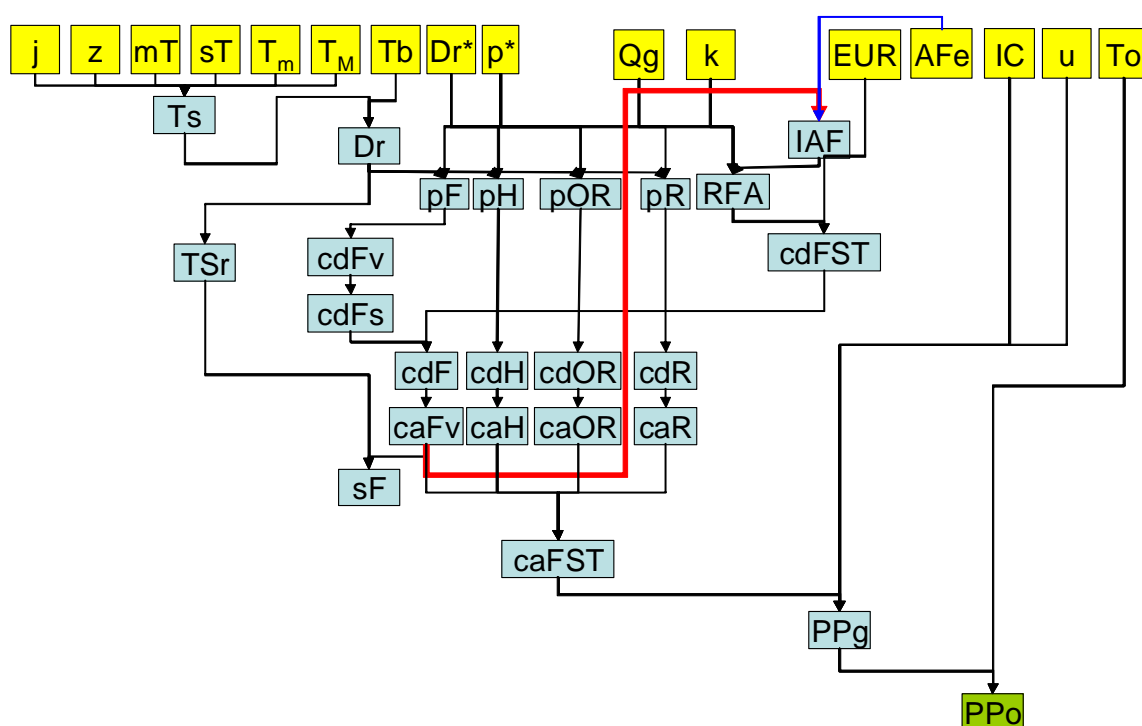


Figura 5 - Modelo estocástico utilizado para o cálculo da produtividade potencial de óleo de soja.

Legenda: (I) variáveis de entrada: dia Juliano (j), variável aleatória com distribuição normal (média nula e desvio padrão unitário) gerada utilizando procedimento estocástico (a partir de uma variável aleatória de distribuição uniforme entre 0 e 1) (z), temperatura média (mT), desvio padrão referente à temperatura média (sT), temperatura mínima (T_m), temperatura máxima (T_M), temperatura basal (T_b), valores críticos de desenvolvimento relativo (Dr*) e de partição de carboidrato (p*), radiação global (Qg), coeficiente de extinção de radiação (k), eficiência de utilização de radiação (EUR), área foliar específica (AFe), índice de colheita (IC) e teor de água (u) e de óleo (To) no grão; (II) variáveis de cálculo: temperatura média diária simulada (Ts), desenvolvimento relativo da cultura de soja (Dr), índice de área foliar (IAF), partição de carboidrato à folha (pF), haste (pH), órgão reprodutivo (pOR) e raiz (pR), radiação fotossinteticamente ativa (RFA), taxa de senescência relativa (TSr), crescimento diário de folha verde (cdFv), folha seca (cdFs), folha (cdF), haste (cdH), órgão reprodutivo (cdOR), raiz (cdR) e fitomassa seca total (cdFST) e crescimento acumulado de folha verde (caFv), haste (caH), órgão reprodutivo (caOR), raiz (caR) e fitomassa seca total (caFST), senescência foliar (sF) e produtividade potencial de grãos (PPg); e (III) variável de saída: produtividade potencial de óleo (PPo)

Tabela 11 - Parâmetros de desenvolvimento da soja usados no modelo PPDSO

Parâmetros	Valores
Coeficiente de Extinção (k)	0,7
IAF crítico	4,0
IAF inicial	0,017
Eficiência do uso da radiação (EUR)	2,3 (g.MJ ⁻¹)
Área Foliar Específica (AF _e)	0,038 m ² .g ⁻¹
Temperatura basal inferior	10°C
Temperatura basal superior	40°C
Temperatura ótima inferior	25°C
Temperatura ótima superior	30°C
Soma calórica para emergência	80°C.dia
Soma calórica da emergência à antese	500°C.dia
Soma calórica da antese ao final do ciclo	888°C.dia
Índice de colheita (IC)	0,55 kg.kg ⁻¹
Fator de depleção (fd)	0,65 kg.kg ⁻¹
Teor de água no grão (u)	0,12 g.g ⁻¹

3.1.1 Fenologia e análise de crescimento

3.1.1.1 Partição de fotoassimilados

Na partição de fotoassimilados, os carboidratos disponíveis, independentemente da disponibilidade e quantidade, são alocados nos diferentes órgãos da planta em proporções definidas pelo estágio fenológico (Figura 6). Portanto, na cultura da soja, os dados de matéria seca são correlacionados à fenologia, segundo escala proposta por Fehr e Caviness (1977) e, também, ao órgão da planta (folhas, raízes, caule e órgãos de armazenamento), com a finalidade de obtenção do coeficiente de partição diário de fotoassimilados da planta de soja e de cada órgão especificamente.

Primeiramente, o maior montante de carboidratos na forma de glicose é usado no crescimento de folhas e raízes, depois caules e finalmente em órgãos de armazenamento. No modelo PPDSO, uma função de alocação é usada para cada órgão, sendo que a soma das partições para os diversos órgãos sempre tem valor igual a 1,0 em todos os estágios de desenvolvimento relativo (Dr) (PENNING DE VRIES et al., 1989).

3.1.1.2 Desenvolvimento relativo

O desenvolvimento relativo na cultura da soja é função da temperatura. A taxa e a época de surgimento dos diversos órgãos dependem da disponibilidade de energia no sistema.

No período antes da antese, para uma mesma variedade, o fotoperíodo crítico não se altera para diferentes épocas de semeadura, mas o período vegetativo é tanto maior quanto mais cedo ocorre a semeadura em relação à data do fotoperíodo crítico (Figura 2).

Quanto maior o período anterior à antese, maior IAF pode ser atingido, resultando em maior potencial produtivo. Há um limite para incremento da produtividade em relação ao IAF, acima do qual não há resposta. Segundo Board e Harville (1992), a interceptação da RFA torna-se máxima no estágio R_1 quando o IAF em soja encontra-se entre 3,5 e 4,0.

As cultivares com período juvenil longo tem valor médio de fotoperíodo de 13 horas. Neste estudo, o fotoperíodo não exercerá efeito sobre os resultados, pois será considerado acima do fotoperíodo crítico.

Como a taxa de desenvolvimento da cultura é alterada pelo comprimento do dia, este efeito é incluído no modelo PPDSO através da modificação na taxa de incremento da soma térmica.

O comprimento do dia (d) é calculado no modelo em função da elevação solar (i.e. ângulo do sol acima do horizonte), determinada pela latitude e dia do ano (GOUDRIAAN; VAN LAAR, 1994):

$$d = 12 \cdot \left[1 + \left(\frac{2}{\pi} \right) \cdot \text{asen} \left\{ \frac{\text{sen}(\lambda) \cdot \text{sen}(\delta)}{\cos(\lambda) \cdot \cos(\delta)} \right\} \right] \quad (1)$$

em que: $\sin(\lambda) \cdot \sin(\delta)$ se refere ao deslocamento solar dependente de sazonalidade em relação à linha do equador; $\cos(\lambda) \cdot \cos(\delta)$ à amplitude dependente de sazonalidade do seno da altura solar; δ à declinação solar em relação à linha do Equador, em radianos; e λ à latitude, em radianos.

No período após a antese, o fotoperíodo não é mais determinante para definição dos estádios fenológicos. A temperatura transcrita como o somatório de graus-dia define o tempo necessário à mudança de estágio. “Para todas as culturas, altas temperaturas geralmente reduzem o tempo de um estágio fenológico” (LÖVENSTEIN et al., 1995).

Durante o período de enchimento de grãos, a principal fonte para desenvolvimento de vagens e grãos são os carboidratos fotossintetizados durante esta fase (SHIBLES et al., 1987; WARDLAW, 1990 apud PROULX; NAEVE, 2009).

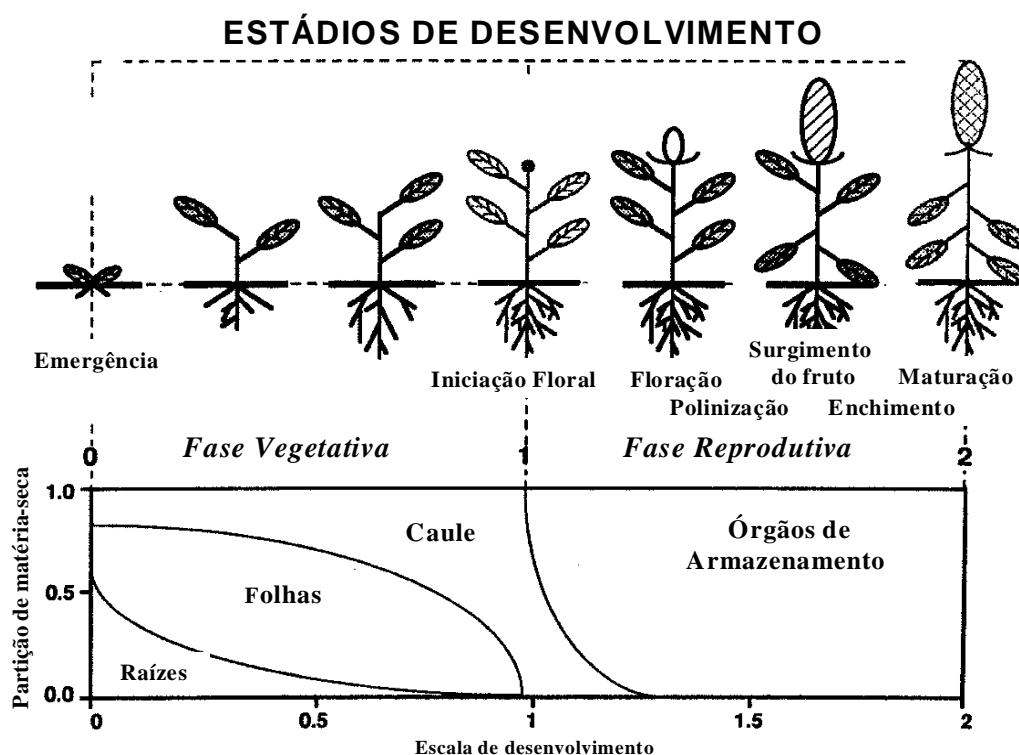


Figura 6 - Visão geral dos estágios de desenvolvimento no ciclo de vida de uma cultura conforme os respectivos estágios de desenvolvimento e partição de fotoassimilados. Fonte: Adaptado de LÖVENSTEIN et al., 1995, p. 36

A aparência morfológica define o estágio do desenvolvimento relativo. O desenvolvimento é um processo irreversível de mudança no estado de um organismo, que geralmente progride de acordo com um padrão mais ou menos fixo, e inerente a cada espécie (GOUDRIAAN; VAN

LAAR, 1994). Desta forma, no modelo PPDSO, é usada a escala proposta por Penning de Vries et al. (1989): o desenvolvimento relativo tem valor 0,0 na emergência, valor 1,0 ao final da fase vegetativa (antese) e, ao final da fase reprodutiva (maturação), tem o valor 2,0.

Como a temperatura exerce a maior influência sobre o desenvolvimento das culturas, o desenvolvimento relativo compreende a soma de graus-dia entre cada um dos períodos de desenvolvimento avaliados descontada a temperatura basal e divididos pelo total de graus-dia do período vegetativo ou reprodutivo, também descontada a temperatura basal. O Dr nos períodos vegetativo e reprodutivo é então calculado da seguinte forma:

$$\text{Dr veg } V_n - V_{(n-1)} = \frac{\sum_{t_{n-1}}^{t_n} (T_{\text{média}} - T_b)}{\sum_{t_0}^{t_{fveg}} (T_{\text{média}} - T_b)} \quad (2)$$

$$\text{Dr repr } R_n - R_{(n-1)} = \frac{\sum_{t_{n-1}}^{t_n} (T_{\text{média}} - T_b)}{\sum_{t_0}^{t_{frepr}} (T_{\text{média}} - T_b)} \quad (3)$$

em que t_n se refere à data da avaliação n , t_{n-1} à data da avaliação anterior ($n-1$), t_0 à data da primeira avaliação, t_{fveg} à data do final do período vegetativo (para $VE \leq t < R_1$), t_{frepr} à data do final do período reprodutivo (para $R_1 \leq t \leq R_8$), Dr veg ao desenvolvimento relativo na fase vegetativa e Dr repr ao desenvolvimento relativo na fase reprodutiva.

3.1.1.3 Somatório de graus-dia

Cada fase de desenvolvimento da soja necessita de um montante de graus-dia e, caso não seja atingido, o desenvolvimento mantém-se inalterado. A soma de graus-dia é diferente para cada fase. Difere também conforme o grupo de maturação (super precoce, precoce, médio e tardio) e entre variedades classificadas dentro de um mesmo grupo.

Neste estudo foram consideradas as seguintes somas térmicas: (i) entre semeadura e emergência, 80°C.dia (TSUM I); (ii) na fase vegetativa, entre a emergência e a antese, 500°C.dia (TSUM I) e, (iii) na fase reprodutiva, entre a antese e a maturação, 888°C.dia (TSUM 2 CE). Valores para o grupo precoce de maturação.

Corrêa (2008) obteve para estas mesmas fases as seguintes somas térmicas: 80, 790 e 935°C.dia, usando a variedade Savana, pertencente ao grupo de maturação tardio. A diferença

entre estes valores de soma térmica reduzem o ciclo na fase vegetativa em 19 dias e na fase reprodutiva em três dias, considerando uma temperatura basal de 10°C e temperatura média de 25°C.

3.1.1.4 Área foliar

O cálculo da radiação fotossinteticamente ativa interceptada é basicamente dependente da área de superfície foliar, pois são os órgãos de maior atividade fotossintética. A simulação do crescimento da cultura de soja é, então, função do índice de área foliar e sua evolução no tempo. Dois períodos distintos ocorrem durante o desenvolvimento da soja quanto à formação de novas folhas: “no início do período de crescimento, quando a cobertura do solo é ainda pequena, o crescimento pode ser limitado pela ‘capacidade do dreno’; e mais tarde, quando a disponibilidade dos fotoassimilados determina a formação de novas áreas foliares, o crescimento da folha tende a se tornar limitado pela ‘capacidade da fonte’ (CORRÊA, 2008).

No período que vai da emergência até o estágio V1, a soja não responde ao fotoperíodo. Nesta fase, denominada período juvenil, Hofstra (1972) demonstrou que a temperatura é o fator ambiental preponderante, tanto para o tamanho final como para a velocidade de aparecimento de novas folhas. Neste período inicial, a área da folha aumenta exponencialmente:

$$\frac{\Delta IAF}{\Delta t} = cr \cdot IAF \quad (4)$$

em que cr se refere à taxa de crescimento relativo (dia^{-1}), e IAF ao índice de área foliar ($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$).

A taxa de crescimento relativo (c_r) é produto da taxa de crescimento relativo da área foliar durante o crescimento exponencial (cr_{exp} , $^{\circ}\text{C} \cdot \text{dia}^{-1}$), pela temperatura efetiva diária ($TEF, ^{\circ}\text{C}$), Integrando Eq.(4) e substituindo cr temos:

$$IAF = IAF_0 \cdot e^{(cr_{\text{exp}} \cdot TEF \cdot t)} \quad (5)$$

Temos então como calcular a taxa de desenvolvimento da área foliar ao longo dos intervalos de tempos diários:

$$IAF_{t+\Delta t} = IAF_t \cdot e^{(cr_{\text{exp}} \cdot TEF \cdot \Delta t)} \quad (6)$$

em que IAF_t refere-se ao índice de área foliar no t -ésimo dia após a emergência, $IAF_{t+\Delta t}$ ao índice de área foliar no $(t+\Delta t)$ -ésimo dia após a emergência.

Portanto, no modelo PPDSO, é calculada a taxa de aumento na área foliar durante o crescimento juvenil por:

$$\frac{\Delta IAF}{\Delta t} = \frac{IAF_{t+\Delta t} - IAF_t}{\Delta t} = \frac{IAF_t \exp^{(c_{exp} \cdot TEF \cdot \Delta t)} - IAF_t}{\Delta t} = \frac{IAF_t (\exp^{(c_{exp} \cdot TEF \cdot \Delta t)} - 1)}{\Delta t} \quad (7)$$

No período após a fase juvenil, a formação de novas áreas foliares torna-se função da disponibilidade de fotoassimilados. O crescimento da área foliar é calculado pelo modelo multiplicando o aumento na massa da folha pela área foliar específica (AF_e) de novas folhas (Tabela 12). Desta forma, AF_e funciona como a razão entre a área foliar e biomassa da mesma, e relaciona a recente fração adicionada de área foliar.

$$\frac{\Delta IAF}{\Delta t} = PF \cdot AF_e \quad (8)$$

em que PF se refere à massa das folhas por unidade de área de solo explorado pela cultura (g de folha por m² de solo), e AF_e à área foliar específica de novas folhas (m² de folha por g de folha).

Tabela 12 - Valores de área foliar específica e área foliar inicial (AF_e e IAF_i, m².g⁻¹) obtidos na literatura

Fonte	Estádio/Fase	Valores de AF _e e IAF _i
Lugg e Sinclair (1979)	Reprodutivo (R ₁)	0,033
Sinclair e Horie (1989)	Inicial	0,012
Boons-Prins et al. (1993)	Antes da floração	0,025
	Inicial	0,0163
Santos et al. (2003)	Antes da floração	0,029
	Inicial	0,017
Corrêa (2008)	Vegetativo	0,035 a 0,039
	Inicial	

Uma taxa relativa de mortalidade (TRM, dia⁻¹) define a senescência das folhas. “O índice de área foliar é obtido integrando o resultado da taxa de crescimento foliar e a taxa de senescência foliar ao longo do tempo” (CORRÊA, 2008).

3.1.1.5 Produção da biomassa e eficiência no uso da radiação

Sob condições ótimas de desenvolvimento, a eficiência no uso da radiação (EUR, g (matéria seca) MJ⁻¹) é considerada linear no tempo (MONTEITH, 1972) e, é a razão entre a biomassa produzida (g.m⁻².d⁻¹) e a radiação interceptada (RFA, MJ.m⁻².d⁻¹). A radiação interceptada depende do IAF e da radiação solar incidente, sendo que a fração fotossinteticamente ativa da radiação interceptada, correspondente a cerca de 50% da radiação total diária. Assume-se que a interceptação de radiação aumenta com o aumento do IAF, pois é menor a transmissividade luminosa à medida que se adentra o dossel vegetativo. Desta forma, o coeficiente específico de extinção de luz, k , caracteriza uma função exponencial negativa do índice de área foliar.

Desta forma, de acordo com a lei de Beer–Bouguer–Lambert:

$$RFA_{int} = 0.5Q_g [1 - \exp^{(-kIAF)}] \quad (9)$$

em que RFA_{int} se refere à radiação fotossinteticamente ativa interceptada (MJ.m⁻².dia⁻¹), Q_g à radiação global diária (MJ.m⁻².dia⁻¹), k ao coeficiente de extinção, IAF ao índice de área foliar.

Neste trabalho, foi utilizado como coeficiente específico de extinção de luz o valor de 0,7 - média dos valores encontrados na literatura (Tabela 13); e um valor de IAF crítico de 4,0. Explica-se esta relação entre k e IAF pelos resultados de Schöeffel e Volpe (2001) e Pereira (2002) que relataram relação linear entre a RFA interceptada e a produção de biomassa e interceptação de 95% da radiação, quando o IAF crítico tem valor próximo de 3,9 e o coeficiente específico de extinção de luz igual a 0,72. O valor de IAF também se encontra na amplitude definida por Board e Harville (1992).

Tabela 13 - Valores de coeficiente de extinção luminosa (k , m^2 de folha por m^2 de solo) obtidos na literatura

Fonte	Valores de k
Sinclair e Horie (1989)	0,6
Spaeth et al. (1987)	0,48
Boons-Prins et al. (1993)	0,5
Azam-Ali et al. (1994)	0,45 - 0,96
Confalone (1999)	0,75 - 0,99
Schöeffel e Volpe (2001) e Pereira (2002)	0,72
Procópio et al. (2003)	0,52 - 0,93

A EUR diária é considerada constante porque a maioria das folhas não fica exposta a intensidades saturantes de radiação durante a maior parte do dia (MONTEITH, 1972; SINCLAIR, 1991; SINCLAIR; MUCHOW, 1999).

O maior valor de EUR encontrado na literatura ($2,3 \text{ g.MJ}^{-1}$) foi definido para este estudo por representar alta eficiência fotossintética e, conseqüentemente, as altas produtividades almejadas pelo melhoramento genético da soja (Tabela 14). É oportuno lembrar que produtividades de 6000 a 6700 kg por hectare já foram registradas por agricultores nos EUA, na década de 60, mas eram variedades altas e com problemas de acamamento (COOPER, 2003).

A taxa de crescimento total diária da cultura ($\text{g (matéria seca).m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$) pode ser então calculada multiplicando a RFA interceptada pela EUR constante.

$$\frac{\Delta W}{\Delta t} = EUR.I \quad (10)$$

em que EUR se refere à eficiência no uso da radiação ($\text{g de matéria seca por MJ}$), I à radiação fotossinteticamente ativa interceptada ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$).

Finalmente, a massa da cultura é obtida integrando a equação (8) ao longo do tempo.

Tabela 14 - Valores de eficiência do uso da radiação (EUR, g.MJ⁻¹) obtidos na literatura

Fonte	Valor de EUR transformados para RFA interceptada
Leadley et al. (1990)	1,72
Daughtry et al. (1992)	2,21
Muchow et al. (1993)	1,72
Sinclair et al. (1992)	2,30
Board et al. (1994)	1,93
Rochette et al. (1996)	2,04
Confalone e Navarro (1999)	1,37
Pengelly et al. (1999)	1,78
Wang et al. (2001)	1,89
Santos et al. (2003)	2,15
Souza et al. (2009)	1,46 (obtido no ano de 2007)
Souza et al. (2009)	1,99 (obtido no ano de 2008)

3.1.1.6 Partição de fotoassimilados

A partição de fotoassimilados pode ser estimada pela diferença de massa de matéria seca dos diferentes órgãos vegetais (folhas, raízes, caule e vagens mais grãos) entre duas avaliações consecutivas (análise de crescimento), dividida pela diferença do desenvolvimento relativo (Dr) de cada estágio, em termos percentuais. O somatório das partições para os diferentes órgãos vegetais, num dado momento (geralmente é utilizado o estágio fenológico), é sempre igual a 1,0.

Os dados do coeficiente de partição diário de fotoassimilados da planta de soja, obtidos por Penning de Vries et al. (1989), são utilizados neste estudo inseridos no modelo PPDSO para estimar a partição de fotoassimilados e a produtividade potencial da cultura de soja.

Os valores visualizados na Figura 7 e na Tabela 15 correspondem à massa de matéria seca acumulada em cada fase do desenvolvimento relativo da cultura da soja. Na fase vegetativa (até Dr igual a 1,0) apenas folhas, raízes e caule crescem. Posteriormente, ocorre a fase reprodutiva (após a antese) onde a alocação de carboidrato aos órgãos de armazenamento cresce à medida que

aos demais órgãos decresce. No final da fase reprodutiva, apenas ocorre acúmulo de massa de matéria seca nos órgãos de armazenamento.

Tabela 15 - Partição de fotoassimilados de folhas, raízes, caule e órgãos de armazenamento da cultura da soja conforme estágios de desenvolvimento relativo

Dr	Folha	Haste	Raiz	Órgãos Reprodutivos	Total
0,000	0,355	0,145	0,500	0,000	1,000
0,500	0,455	0,245	0,300	0,000	1,000
1,000	0,560	0,240	0,200	0,000	1,000
1,600	0,180	0,000	0,000	0,820	1,000
1,800	0,000	0,000	0,000	1,000	1,000
2,000	0,000	0,000	0,000	1,000	1,000

Fonte: PENNING DE VRIES et al., 1989, p. 91

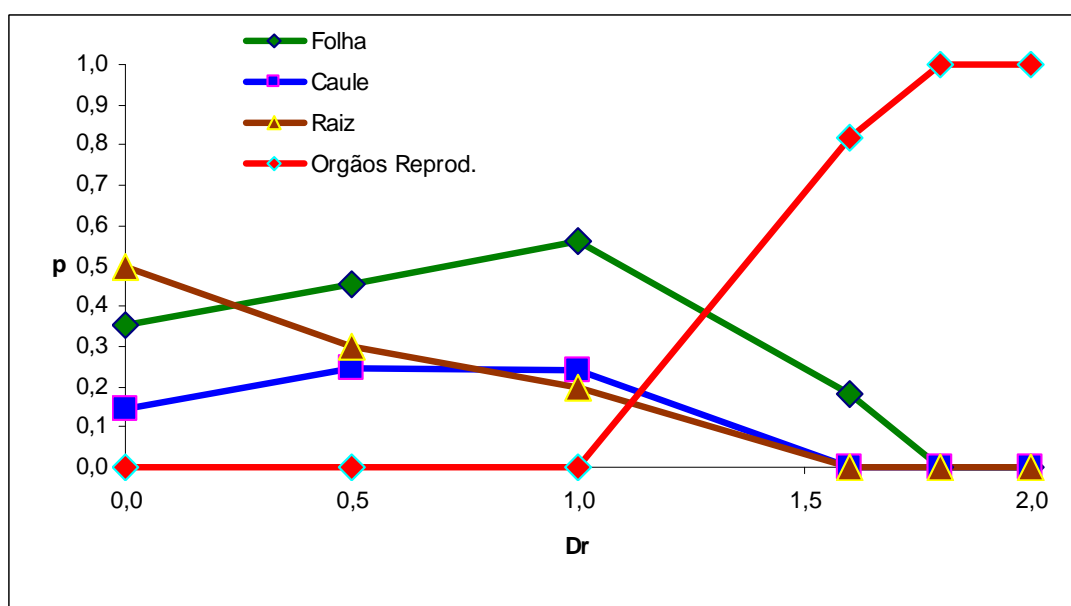


Figura 7 - Partição de fotoassimilados de folhas, raízes, caule, órgãos de armazenamento da cultura da soja conforme estágios de desenvolvimento relativo. Fonte: PENNING DE VRIES et al., 1989, p. 91

3.1.1.7 Conversão de fotoassimilados

A glicose proveniente da fotossíntese é convertida nos cinco componentes orgânicos básicos constituintes dos tecidos vegetais: carboidratos, proteínas, gorduras, lignina e ácidos orgânicos; a um custo de conversão diferenciado por tipo de órgão e espécie vegetal. O custo de

conversão denota a eficiência fotossintética de cada espécie na transformação de energia solar em fotoassimilados.

“Crescimento consiste nos processos biossintéticos *per se*, ou seja, conversão de glicose em outros componentes orgânicos, mais translocação da glicose da produção ao “site” de crescimento, mais (no caso de leguminosas) o custo de redução do nitrogênio” (PENNING DE VRIES et al., 1989). Na Tabela 16 temos a necessidade de glicose para formação, transporte e redução de N na formação dos componentes orgânicos. Na Tabela 17 estão os valores médios da composição química dos órgãos vegetais da soja e, na Tabela 18, a eficiência de conversão.

Tabela 16 - Necessidade de glicose na formação (A) e transporte (B) de carboidratos, proteínas, gorduras, lignina, ácidos orgânicos e minerais; necessidade de glicose na redução e transporte de N para formação de proteínas (C); necessidade total ($D = A+B+C$) e fator de conversão ou eficiência de conversão ($EF=1/D$)

Composto	A*	B*	C*	D*	EF**
Carboidratos	1,211	0,064	0,000	1,275	0,784
Proteínas	1,793	0,094	0,897	2,784	0,359
Gorduras	3,030	0,159	0,000	3,189	0,314
Lignina	2,119	0,112	0,000	2,231	0,448
Ácidos orgânicos	0,906	0,048	0,000	0,954	1,048
Minerais	0,000	0,120	0,000	0,120	8,333

Fonte: Penning de Vries et al. (1989), p. 61

* grama de glicose por grama de produto

** grama de produto por grama de glicose

Tabela 17 - Valores médios da composição química de folhas, caules e raízes de leguminosas e valor médio dos órgãos de armazenamento (vagens + sementes) de soja divididos em carboidratos (CHO, %), proteínas (PRO, %), lipídeos (LIP, %), lignina (LIG, %), ácidos orgânicos (AOR, %) e minerais (MIN, %) e fator de conversão (CVF, gramas do produto por grama de glicose)

Órgão	CHO	PRO	LIP	LIG	AOR	MIN	CVF
Folha	52	25	5	5	5	8	0,59
Caules	62	10	2	20	2	4	0,62
Raízes	56	10	2	20	2	10	0,64
Órgãos de Armazenamento	29	37	18	6	5	5	0,46

Fonte: Penning de Vries et al. (1989), p. 64

Para cálculo da eficiência de conversão (EC) temos então:

$$EC_f = T_{f_{CHO}} \cdot EF_{CHO} + T_{f_{PRO}} \cdot EF_{PRO} + T_{f_{LIP}} \cdot EF_{LIP} + T_{f_{LIG}} \cdot EF_{LIG} + T_{f_{AOR}} \cdot EF_{AOR} + T_{f_{MIN}} \cdot EF_{MIN} \quad (11)$$

$$EC_c = T_{c_{CHO}} \cdot EF_{CHO} + T_{c_{PRO}} \cdot EF_{PRO} + T_{c_{LIP}} \cdot EF_{LIP} + T_{c_{LIG}} \cdot EF_{LIG} + T_{c_{AOR}} \cdot EF_{AOR} + T_{c_{MIN}} \cdot EF_{MIN} \quad (12)$$

$$EC_r = T_{r_{CHO}} \cdot EF_{CHO} + T_{r_{PRO}} \cdot EF_{PRO} + T_{r_{LIP}} \cdot EF_{LIP} + T_{r_{LIG}} \cdot EF_{LIG} + T_{r_{AOR}} \cdot EF_{AOR} + T_{r_{MIN}} \cdot EF_{MIN} \quad (13)$$

$$EC_o = T_{o_{CHO}} \cdot EF_{CHO} + T_{o_{PRO}} \cdot EF_{PRO} + T_{o_{LIP}} \cdot EF_{LIP} + T_{o_{LIG}} \cdot EF_{LIG} + T_{o_{AOR}} \cdot EF_{AOR} + T_{o_{MIN}} \cdot EF_{MIN} \quad (14)$$

Tabela 18 - Eficiência de conversão em massa de matéria de folha (EC_f , $kg.kg^{-1}$), eficiência de conversão em massa de caule (EC_c , $kg.kg^{-1}$), eficiência de conversão em massa de raiz (EC_r , $kg.kg^{-1}$) e eficiência de conversão em massa de órgãos reprodutivos (EC_o , $kg.kg^{-1}$) de soja

Órgão		CHO	PRO	LIP	LIG	AOR	MIN	Total
Folha	Custo conversão	0,78	0,36	0,31	0,45	1,05	8,33	
	Eficiência	0,41	0,09	0,02	0,02	0,05	0,67	1,25
Caule	Custo conversão	0,78	0,36	0,31	0,45	1,05	8,33	
	Eficiência	0,48	0,04	0,01	0,09	0,02	0,33	0,97
Raiz	Custo conversão	0,78	0,36	0,31	0,45	1,05	8,33	
	Eficiência	0,44	0,04	0,01	0,09	0,02	0,83	1,42
Órgãos reprod.	Custo conversão	0,78	0,36	0,31	0,45	1,05	8,33	
	Eficiência	0,23	0,13	0,06	0,03	0,05	0,42	0,91

3.1.1.8 Fitomassa seca

A fitomassa seca é resultado da multiplicação da fotossíntese líquida pela partição de carboidrato para folha (P_f , $kg.kg^{-1}$), caule (P_c , $kg.kg^{-1}$), raiz (P_r , $kg.kg^{-1}$) e órgãos reprodutivos (P_o , $kg.kg^{-1}$) e a eficiência de conversão em massa de matéria seca de folha (EC_f , $kg.kg^{-1}$), caule (EC_c , $kg.kg^{-1}$), raiz (EC_r , $kg.kg^{-1}$) e órgãos reprodutivos (EC_o , $kg.kg^{-1}$).

$$FS_f = FL \cdot P_f \cdot EC_f \quad (15)$$

$$FS_c = FL \cdot P_c \cdot EC_c \quad (16)$$

$$FS_r = FL \cdot P_r \cdot EC_r \quad (17)$$

$$FS_o = FL \cdot P_o \cdot EC_o \quad (18)$$

Portanto, a fitomassa seca total (FST , $kg.ha^{-1}$) é a soma das fitomassas secas individuais.

$$FST = FS_f + FS_c + FS_r + FS_o \quad (19)$$

3.1.1.9 Cálculo da produtividade potencial de grãos e de óleo

A produtividade potencial de grãos (PPg, kg.ha⁻¹) da soja é então calculada:

$$PPg = IC.FST/(1-u) \quad (20)$$

em que IC se refere ao índice de colheita, e u ao teor de água, a base de massa.

O índice de colheita (IC) é a fração de matéria seca total elaborada correspondente ao órgão de interesse colhido (neste caso, os grãos de soja), obtida em dados experimentais. Em experimento de quatro anos sob condições ótimas de desenvolvimento, Pedersen e Lauer (2004) obtiveram índices de colheita de três cultivares de soja variando entre 54,5 e 60,1%. Neste estudo, foi usado o valor de 55,0%.

A produtividade potencial de óleo (PPo, kg.ha⁻¹) representa entre 18 e 22% do total da PPg. Neste cálculo será usada opinião de especialistas para definição do teor de óleo (To) com uso de ferramenta estatística melhor descrita no item 3.2.

$$PPo = PPg.To \quad (21)$$

3.1.2 Fator de depleção

Define-se fator de depleção como um redutor da produtividade potencial. A produtividade potencial atingida em experimentos a campo, onde o uso de tecnologia é intensivo e controlado para obtenção dos melhores resultados, não se traduz na realidade de campo, onde as áreas são extensivas e o controle de deficiências nutricionais, doenças, pragas e plantas daninhas nem sempre é possível no melhor momento ou, no caso de estresses hídricos, não é possível em quase totalidade da área plantada com soja no país.

Desta forma, o fator de depleção torna o resultado mais próximo da realidade de campo e, neste trabalho, definiu-se um redutor de 35% na produtividade potencial.

3.1.3 Elementos do clima

A produtividade potencial de óleo de soja foi estimada na localidade de Piracicaba (SP), baseando-se em séries históricas das variáveis climáticas de temperatura (máxima, mínima e média) e radiação global. Os períodos abrangidos estão na Tabela 19. Os dados diários de temperatura máxima e mínima foram obtidos na estação agrometeorológica da ESALQ. Os dados diários de temperatura média (mT , °C), desvio padrão (sT , °C), temperatura máxima média (T_M , °C), temperatura mínima média (T_m , °C), maior valor de temperatura máxima (MT_M , °C), menor valor de temperatura mínima (mT_m , °C) e radiação global (Q_g , MJ.m⁻².dia⁻¹) obtidos estão nas Tabelas 1a a 5a do Anexo I. Os dados geodésicos das localidades encontram-se na Tabela 20.

Tabela 19 - Período abrangido, número de anos e fonte dos dados de temperatura e radiação global

Local	Dados de temperatura		Dados de radiação global	
	Período	Anos	Período	Anos
Piracicaba (SP)	1966-2009	40 ¹	1978-2009	32 ²

Fonte: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ/USP)

1 - Dados a partir de janeiro de 1966. Faltam dados do período entre 1971 e 1974

2 - Dados a partir de janeiro de 1978

Tabela 20 - Dados geodésicos para estimativa da produtividade potencial de óleo de soja

Local	Latitude	Longitude	Altitude
Piracicaba	22°42'30" Sul	47°38'00" Oeste	546 m

Fonte: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ/USP)

3.2 Tratamento estatístico

Dada a variabilidade natural de dados climáticos, o uso de ferramenta probabilística fez-se necessária para quantificar as incertezas no modelo dos parâmetros temperatura máxima, temperatura mínima e temperatura média.

Quando um modelo utiliza simulação através de ferramentas probabilísticas onde um ou mais de seus parâmetros de entrada são tratados como variável aleatória, este modelo é

denominado estocástico. Um modelo que utiliza dados de entrada pontuais, como as médias de temperatura, sem considerar amplitude e a incerteza associada, é denominado modelo determinístico (MAIA, 2003).

Inserida no modelo PPDSO, a simulação estocástica com 1000 amostras para determinação de produtividade utiliza distribuição de probabilidade normal truncada¹, para valores diários de temperatura. Segundo Assis (2004), a distribuição normal truncada é a mais adequada para previsão de produtividade. Para tal simulação, foram utilizados os dados de temperatura média e seu respectivo desvio padrão, e os valores de temperatura máxima e mínima. Para radiação global foi considerada a média histórica diária. Esta simulação foi gerada para cada dia do ciclo da cultura tendo como valores extremos os mínimos valores de temperatura mínima e os máximos valores de temperatura máxima da série histórica.

No procedimento estocástico, é gerada uma variável aleatória com distribuição uniforme entre 0 e 1. Posteriormente, este valor é transformado numa variável aleatória (z) com distribuição normal, média nula e desvio padrão unitário $\{z(0, 1)\}$, conforme rotina computacional (em Visual Basic) a seguir (MAIA, 2003).

```

Sub Simula_T()
rem Distribuição NORMAL TRUNCADA
For x = 1 To 1000
    ValorMinimoTemp = T_min(x)
    ValorMaximoTemp = T_max(x)
    Cont1 = 0
    Cont2 = 0
    Randomize
Passo1:
    U1 = Rnd
    U2 = Rnd
    V1 = 2 * U1 - 1
    V2 = 2 * U2 - 1
    S = V1 ^ 2 + V2 ^ 2
    If S > 1 Then GoTo Passo1
    xx = V1 * Sqr(-2 * Log(S) / S)
    Media = T_med(x)
    Desvio = S_T(x)
    TempMedia = Media + xx * Desvio
    If TempMedia < ValorMinimoTemp Then
        Cont1 = Cont1 + 1
    
```

¹ Descrição da distribuição de probabilidade normal truncada encontra-se no Anexo II.

```

    GoTo Passo1
ElseIf TempMedia > ValorMaximoTemp Then
    Cont2 = Cont2 + 1
    GoTo Passo1
End If
T_med(x) = TempMedia
Next x
End Sub

```

Para determinação do teor de óleo, também foi utilizado o procedimento estocástico. Foi também simulado 1000 vezes com uso de distribuição de probabilidade triangular assimétrica² (procedimento utilizado quando se adota opinião de especialistas), baseado nos resultados da simulação anterior. Os valores utilizados variaram em torno da média de 19% e com extremos de 18,05% e 20,9% por sugestão do autor. O procedimento utilizado foi efetuado conforme rotina computacional (em Visual Basic) a seguir (MAIA, 2003).

```

Sub SimulaOleo()
    Rem Distribuição TRIANGULAR ASSIMÉTRICA
    Cont1 = 0
    Cont2 = 0
    Randomize
Passo2:
    U1 = Rnd
    U2 = Rnd
    a1 = Val(Form1.Combo3.Text) * Val(Form1.Combo4.Text)
    m1 = Val(Form1.Combo3.Text)
    b1 = Val(Form1.Combo3.Text) * Val(Form1.Combo5.Text)
    Y1 = ((U1 + U2) / 2)
    TeorOleo = a1 + Sqr((b1 - a1) * (m1 - a1) * Y1)
    If TeorOleo < a1 Then
        Cont1 = Cont1 + 1
        GoTo Passo2
    ElseIf TeorOleo > b1 Then
        Cont2 = Cont2 + 1
        GoTo Passo2
    End If
    TeorOleo = TeorOleo / 100
End Sub

```

² Descrição da distribuição de probabilidade triangular assimétrica encontra-se no Anexo II.

3.3 Datas de semeadura

Foram consideradas oito datas de semeadura, nos dias primeiro e quinze dos meses de setembro, outubro, novembro e dezembro, abrangendo um período mais amplo que o recomendado. Na região Centro-oeste, a época recomendada inicia-se em 20 de outubro e finaliza-se em 10 de dezembro, podendo estender-se até 20 de dezembro em áreas bem corrigidas, de alta fertilidade e com manejo de alta tecnologia (EMBRAPA, 2004, 2005). De um modo geral, nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste os maiores rendimentos de grãos ocorrem quando a soja é semeada entre a segunda quinzena de outubro e o mês de novembro (URBEN FILHO; SOUZA, 1992; QUEIROZ et al., 1998; COSTA VAL et al., 2003; TECNOLOGIAS, 2006; CULTIVARES, 2007 apud EMBRAPA, 2007a).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Variação temporal da temperatura em Piracicaba (SP)

A temperatura é um dos fatores de produção mais importantes para a definição da produtividade potencial das culturas. A água e demais componentes climáticos definem a depleção dessa produtividade.

A Figura 9 contém os dados históricos de temperatura média (mT , °C), média máxima (T_M , °C) e média mínima diárias (T_m , °C) e a temperatura média anual dos últimos 40 anos em Piracicaba. A temperatura média diária inicia o ano com valores próximos a 25°C em janeiro, permanecendo neste valor até final de fevereiro, quando passa haver declínio até os meses de junho e julho. Em agosto a temperatura média começa a elevar-se até atingir patamares semelhantes ao do início do ano nos meses de novembro e dezembro. A temperatura média diária iguala-se à temperatura média anual (21,81°C) no final de abril e início de outubro.

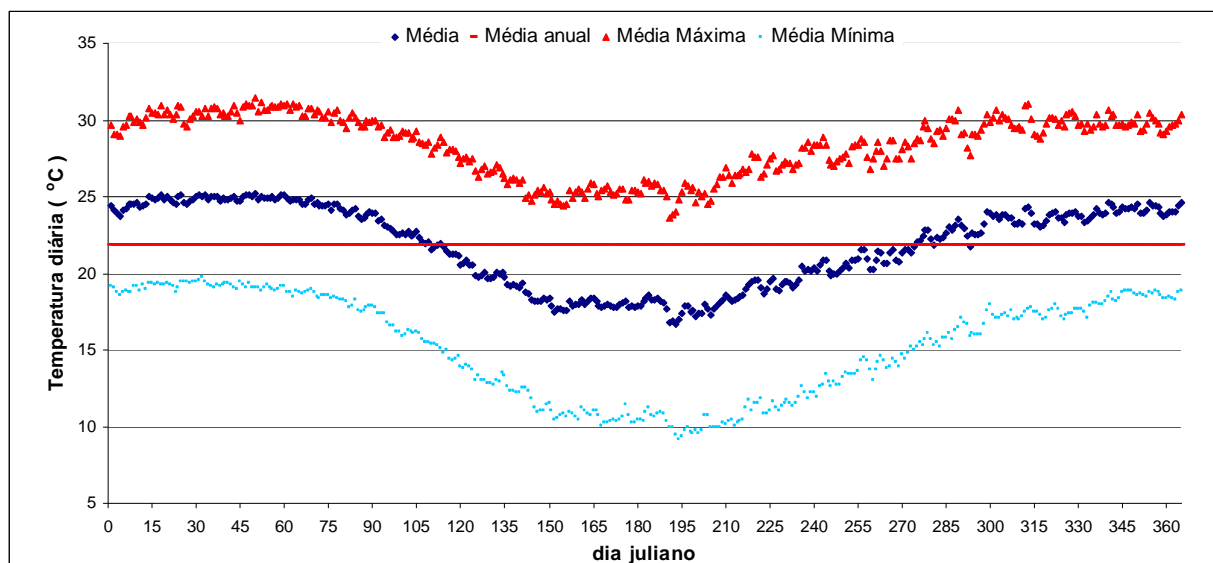


Figura 8 - Variabilidade temporal da série histórica anual de temperatura média diária (°C) e a temperatura média histórica anual em Piracicaba (SP)

As temperaturas médias diárias durante todo o ano estão dentro dos valores preconizados como temperaturas basais inferior e superior para a cultura da soja, respectivamente 10 e 40°C. Dentro destes patamares, estes valores de temperatura média diária não se constituem

impedimento ao cultivo desta oleaginosa, porém como há variação em torno desta média, na randomização utilizou-se o conjunto de mínimos valores de temperatura mínima diária e o de máximos valores de temperatura máxima diária da série histórica para determinação da produtividade de grãos e óleo. Estes valores resultantes da aleatorização podem ser observados nas Figuras 10 e 11. Verifica-se que apesar das semeaduras nos meses de setembro e outubro estarem sujeitas a temperaturas mínimas abaixo da temperatura basal inferior de 10 °C, a temperatura média diária sempre está acima deste patamar. A temperatura basal superior poucas vezes é atingida pela temperatura máxima diária.

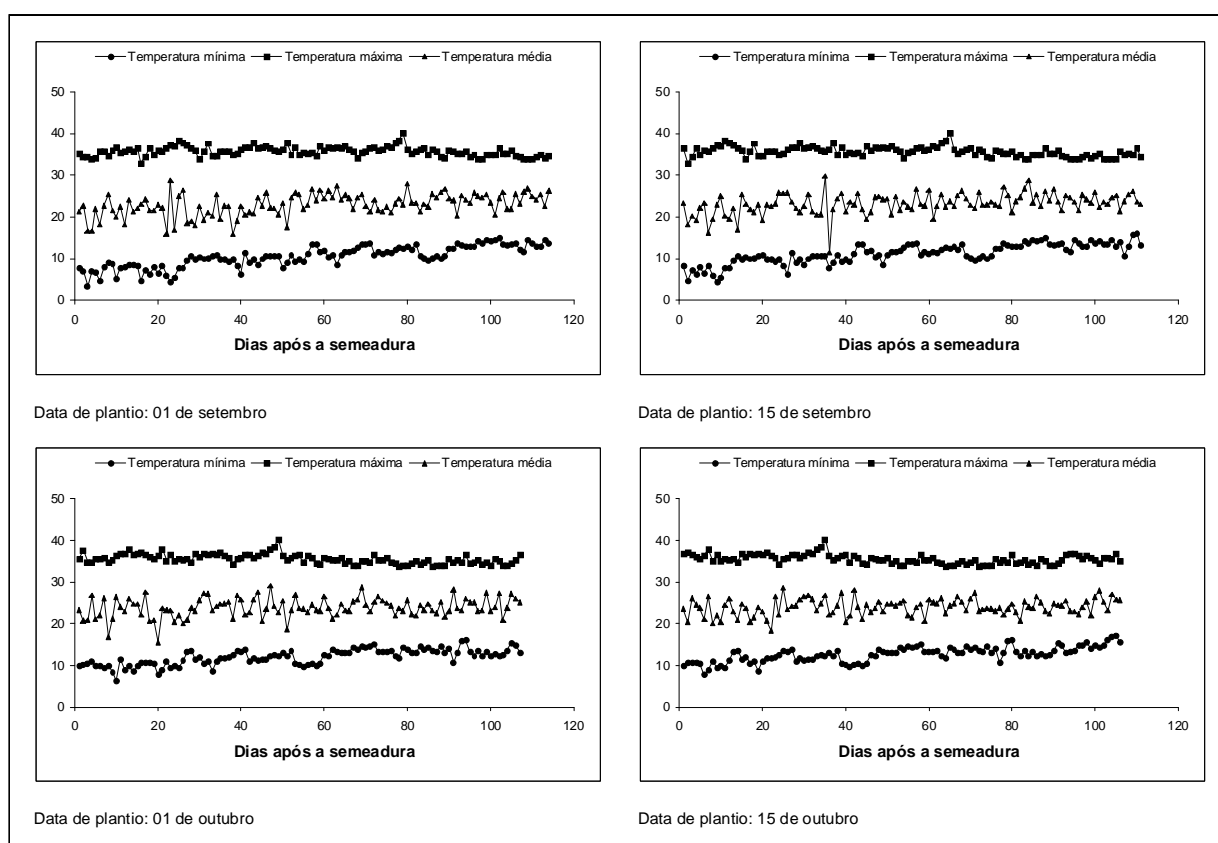


Figura 9 - Variabilidade temporal de temperatura média diária (°C) na localidade de Piracicaba (SP) para semeaduras em setembro e outubro

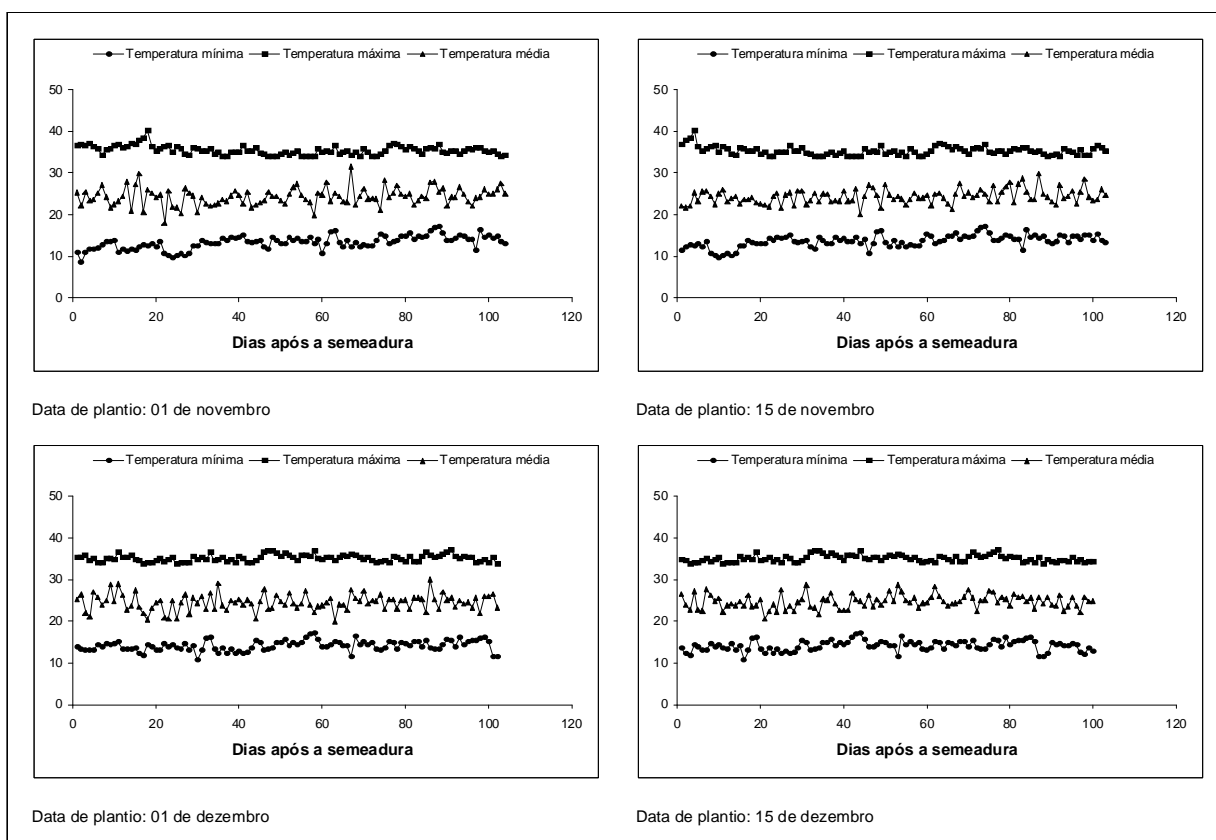


Figura 10 - Variabilidade temporal de temperatura média diária (°C) na localidade de Piracicaba (SP) para sementeiras em novembro e dezembro

4.2 Variação temporal da radiação em Piracicaba (SP)

A radiação solar é a principal fonte de energia para a manutenção da vida na Terra. É o elemento meteorológico mais importante, pois desencadeia os processos de aquecimento, evaporação, transpiração e fotossíntese. A quantidade de radiação solar que atinge a atmosfera terrestre varia de acordo com a época do ano devido à órbita elíptica da Terra ao redor do Sol (MARIN, 2009).

A Figura 12 contém os dados históricos de radiação média diária ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$) dos últimos 32 anos em Piracicaba. A radiação média diária tem seus menores valores entre os meses de maio e julho. No final de julho, os valores da radiação passam a crescer até atingir as maiores médias do ano nos meses de novembro e dezembro e tornam a declinar a partir de janeiro.

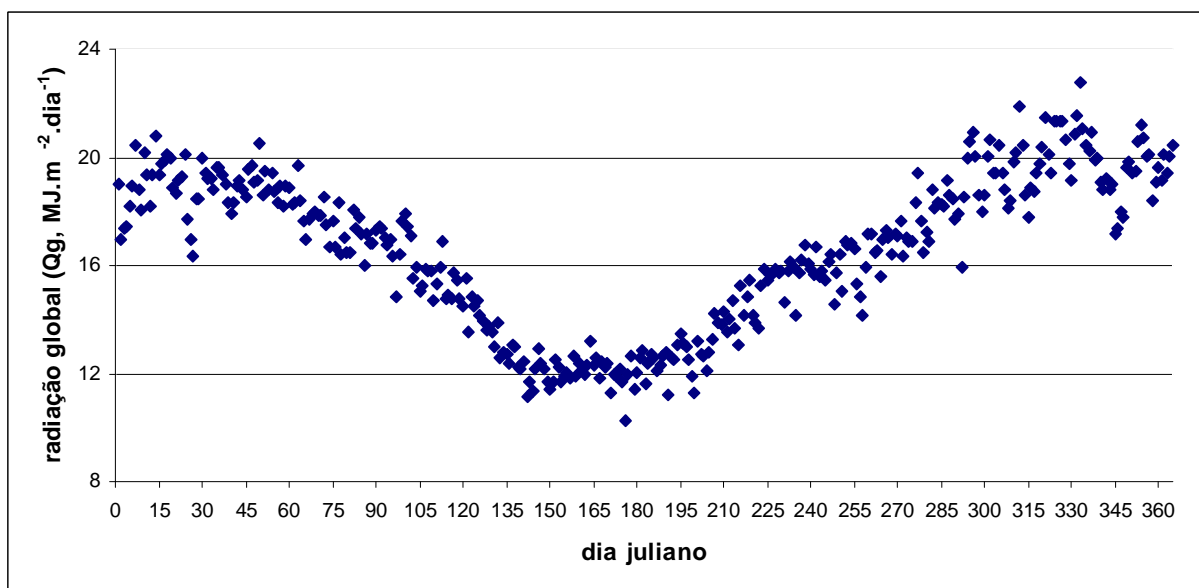


Figura 11 - Variabilidade temporal da série histórica anual de radiação global média diária (Q_g , $\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$) em Piracicaba (SP)

4.3 Radiação global e radiação fotossinteticamente ativa interceptada

A radiação fotossinteticamente ativa (RFA, 400-700 nm de comprimento de onda) representa aproximadamente 50% da radiação solar e pouco varia com a intensidade de radiação (MONTEITH, 1973 apud PENNING DE VRIES et al., 1989). A RFA interceptada pelo dossel da cultura é função do IAF e da radiação global incidente.

Nos gráficos contidos nas Figuras 13 e 14 podemos verificar que à medida que as datas de semeadura sucedem-se, a máxima RFA interceptada ($10 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$) é obtida com menos dias de ciclo da cultura de soja. Na primeira data de semeadura (primeiro de setembro), a cultura alcança os 40 dias após a semeadura (DAS) sem ter atingido a máxima RFA. Na segunda data de semeadura, a máxima RFA é interceptada aos 40 DAS e, nos semeaduras de novembro e dezembro a máxima RFA é atingida próximo dos 30 DAS.

O declínio na interceptação da radiação dá-se pela senescência das folhas. Na primeira data de semeadura, este declínio inicia-se após os 80 DAS. Na data de quinze de setembro o declínio começa aos 70 DAS e nas demais datas a partir dos 60 DAS.

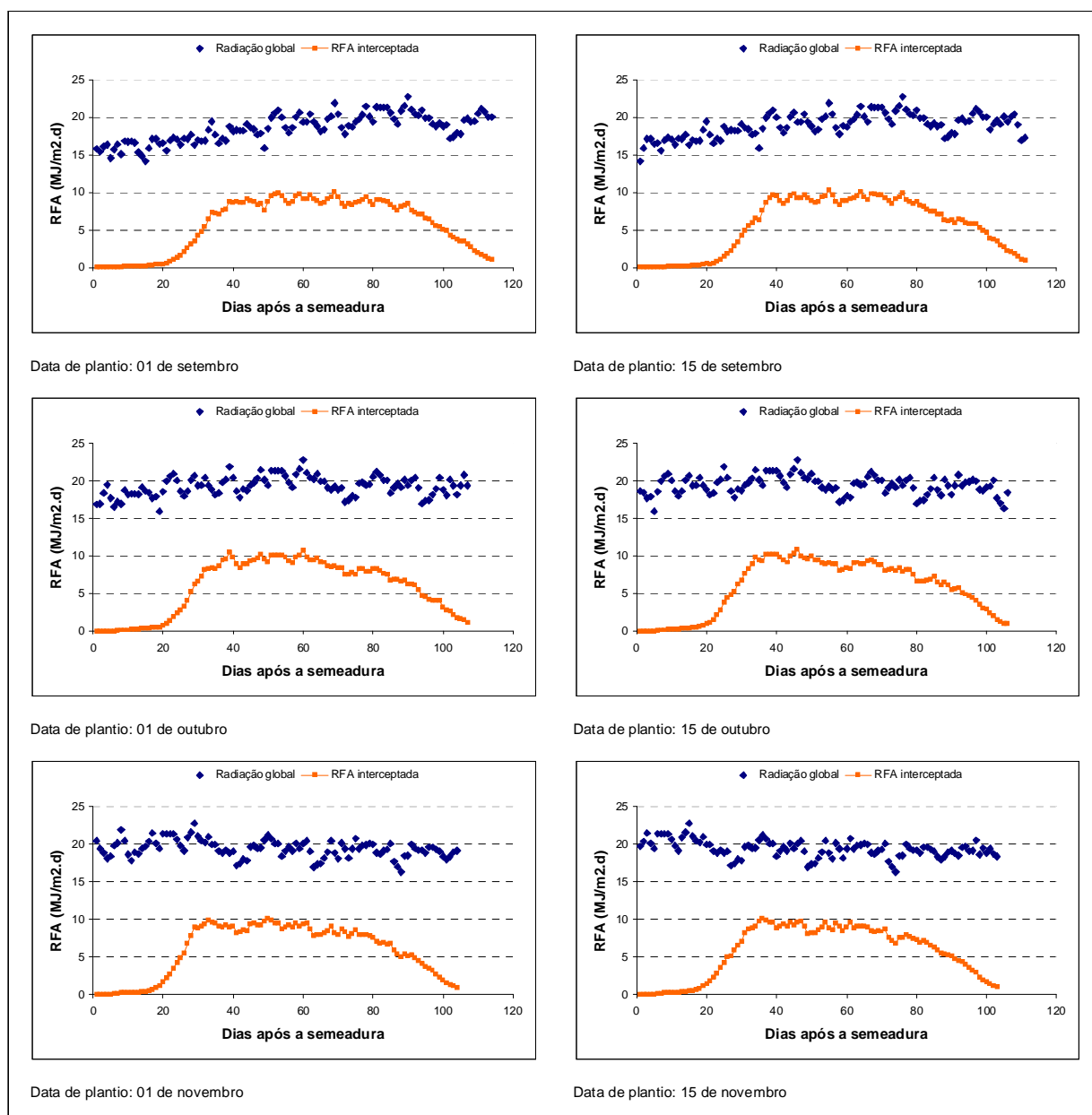


Figura 12 - Radiação global média diária ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$) e radiação fotossinteticamente ativa interceptada (RFA, $\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$) para a localidade de Piracicaba (SP) em semeaduras efetuados em setembro, outubro e novembro

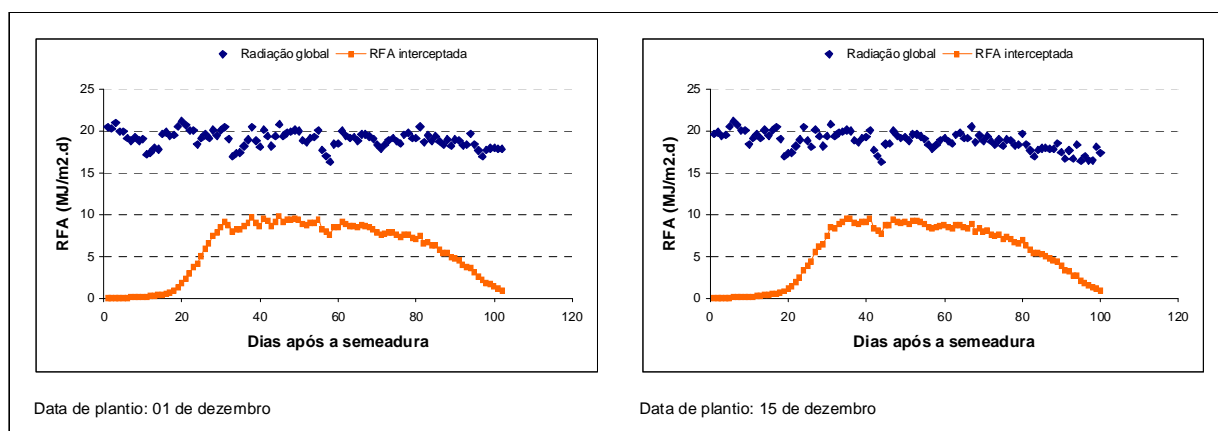


Figura 13 - Radiação global média diária ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$) e radiação fotossinteticamente ativa interceptada (RFA, $\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$) para a localidade de Piracicaba (SP) em semeaduras efetuados em dezembro

4.4 Índice de área foliar

A utilização da radiação global pelas culturas depende da área foliar passível de interceptá-la, como pode ser verificado nos gráficos das Figuras 15 e 16. No início do desenvolvimento da soja, o IAF é baixo até aproximadamente os 20 dias quando ocorre desenvolvimento exponencial até atingir o IAF crítico. O IAF crítico para máxima interceptação da RFA na soja está entre 3,5 e 4,0. Atingido o IAF crítico, este se mantém neste patamar por um período e volta a decrescer pela senescência das folhas.

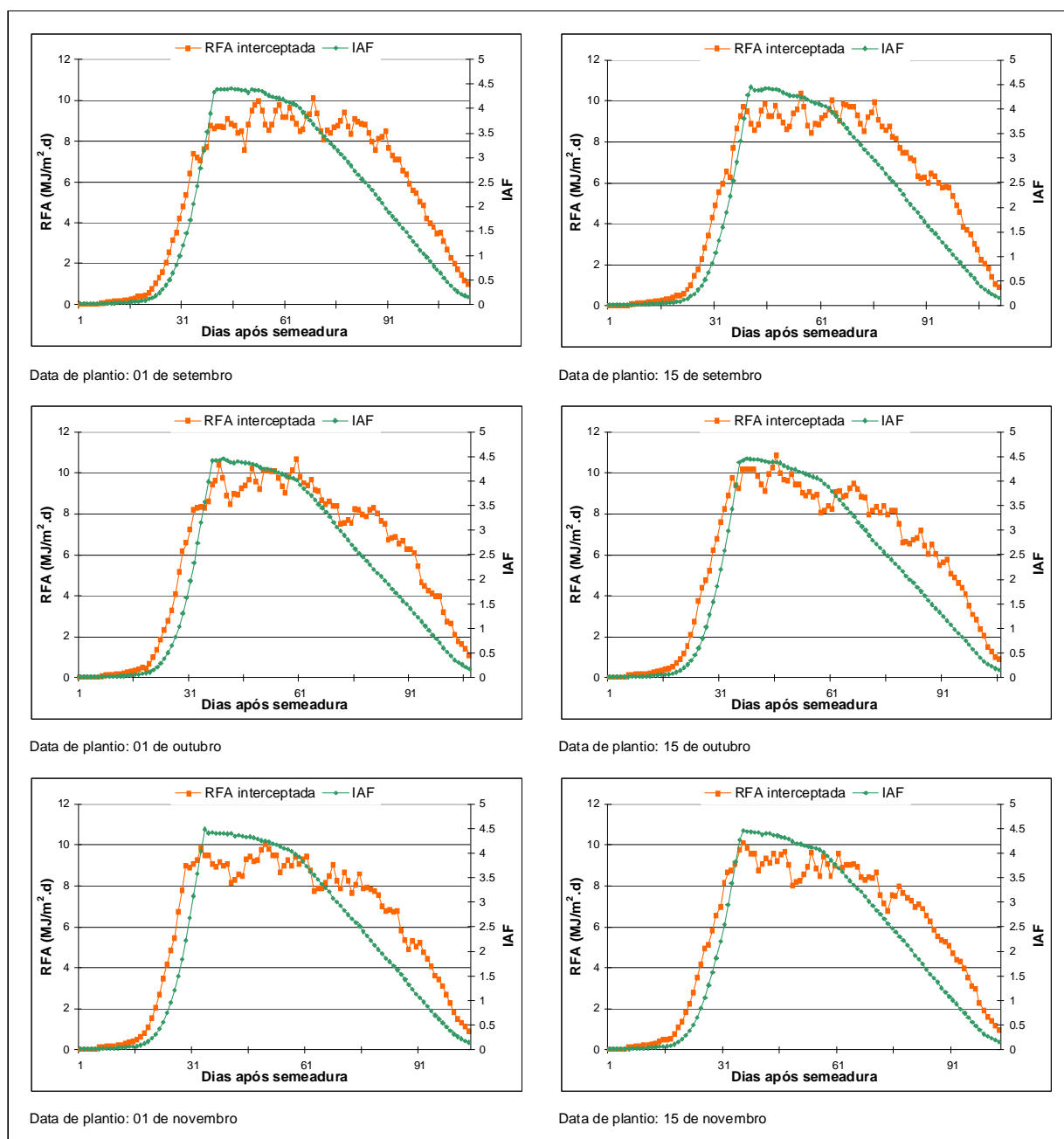


Figura 14 - Índice de área foliar (IAF, $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$) e radiação fotossinteticamente ativa interceptada (RFA, $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$) para a localidade de Piracicaba (SP) em semeaduras efetuadas em setembro, outubro e novembro

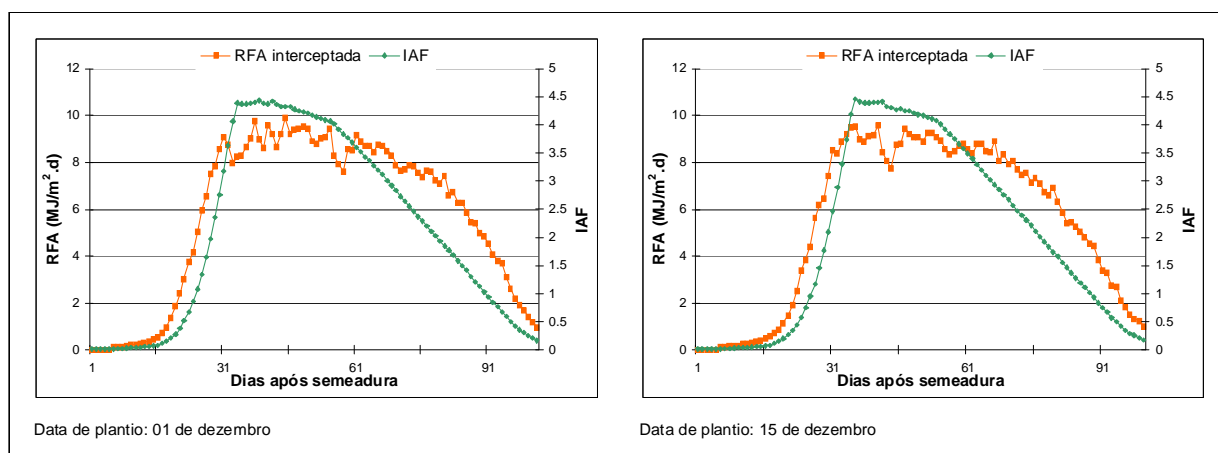


Figura 15 - Índice de área foliar (IAF, $\text{m}^2.\text{m}^{-2}$) e radiação fotossinteticamente ativa interceptada (RFA, $\text{MJ}.\text{m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$) para a localidade de Piracicaba (SP) em semeaduras efetuadas em dezembro

4.5 Duração do ciclo

O ciclo da cultura da soja foi simulado pelo modelo PPDSO mil vezes, conforme distribuição de probabilidade normal truncada, para os dados de temperatura máxima, mínima e média para cada data de semeadura estipulada.

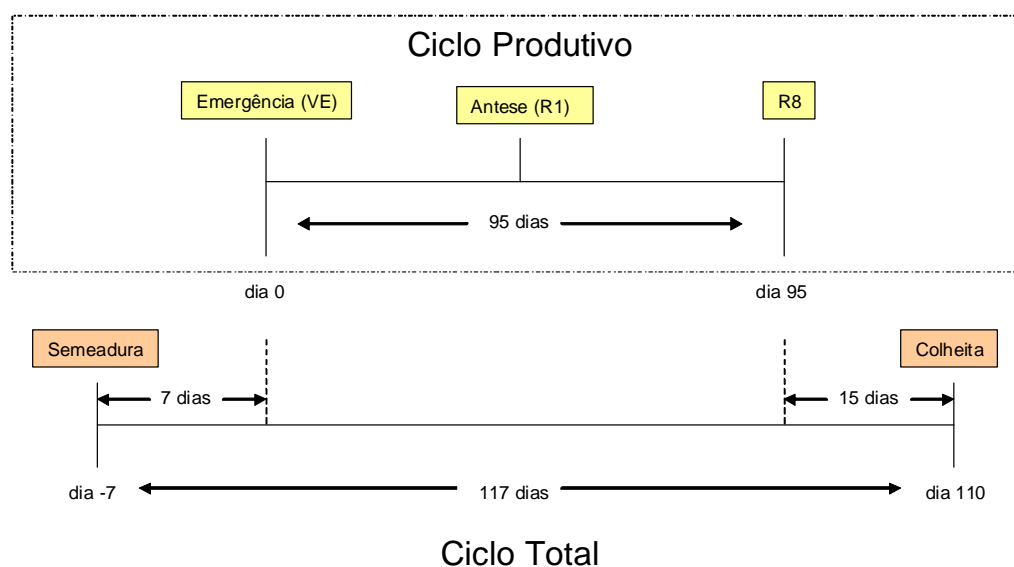


Figura 16 - Diagrama dos ciclos produtivo e total considerando sete dias para emergência e quinze dias para colheita

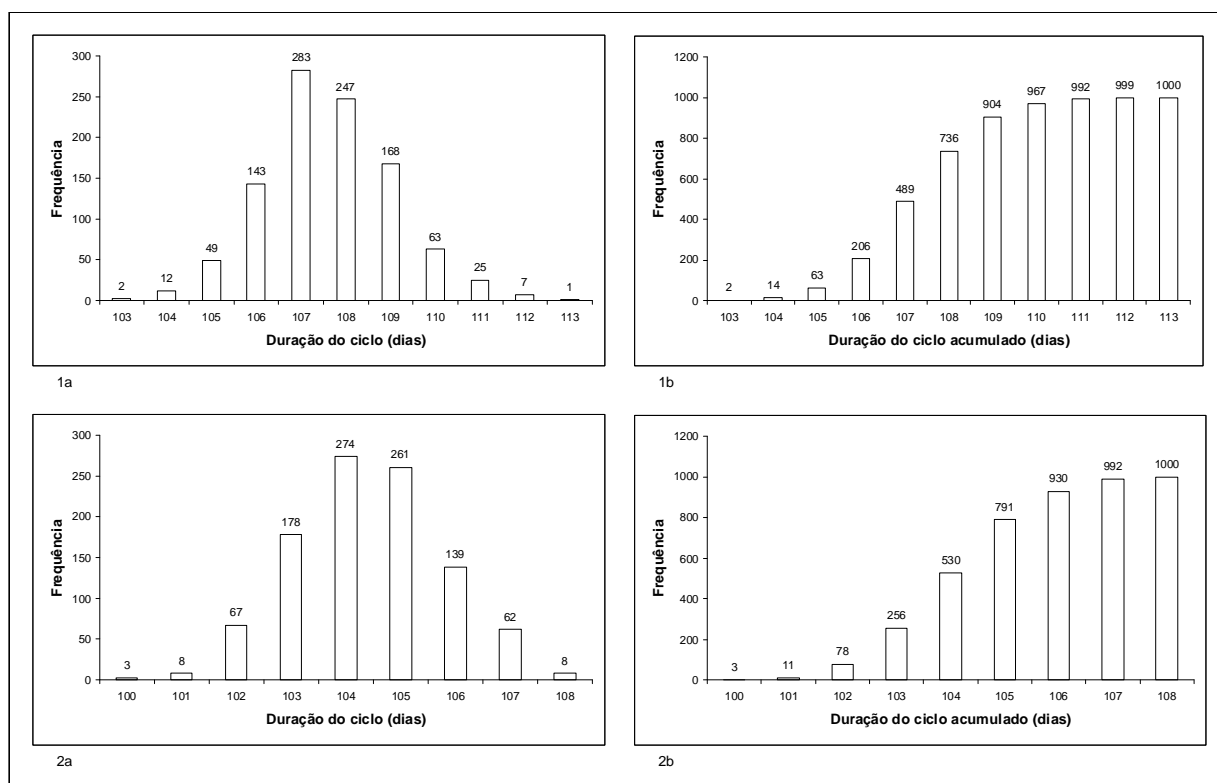


Figura 17 - Duração do ciclo produtivo resultantes do modelo PPDSO para a localidade de Piracicaba (SP) após 1.000 simulações: (a) frequência de resultados de duração do ciclo produtivo; (b) frequência acumulada, (1) semeadura em primeiro de setembro, (2) semeadura em quinze de setembro

A duração do ciclo neste estudo, denominado ciclo produtivo, refere-se ao período vegetativo compreendido entre a emergência (VE) e a antese (R_1) mais o período reprodutivo compreendido entre a antese (R_1) e a senescência (R_8). Na duração do ciclo não estão considerados os períodos entre a semeadura e a emergência e entre a senescência e a colheita, como pode ser visualizado na Figura 17.

Ao longo das oito datas de semeadura, o número de dias para a cultura completar o ciclo diminuiu (Figuras 18, 19 e 20) devido ao aumento da temperatura no transcorrer do período. Na primeira data de semeadura (1/9) houve 28,3% de probabilidade de ocorrência de ciclo de 107 dias e 90,4% de probabilidade para duração do ciclo igual ou inferior a 109 dias. Na segunda data de semeadura (15/9) houve redução do ciclo para 104 dias (27,4% de probabilidade) com 93% de probabilidade para duração do ciclo igual ou inferior a 106 dias.

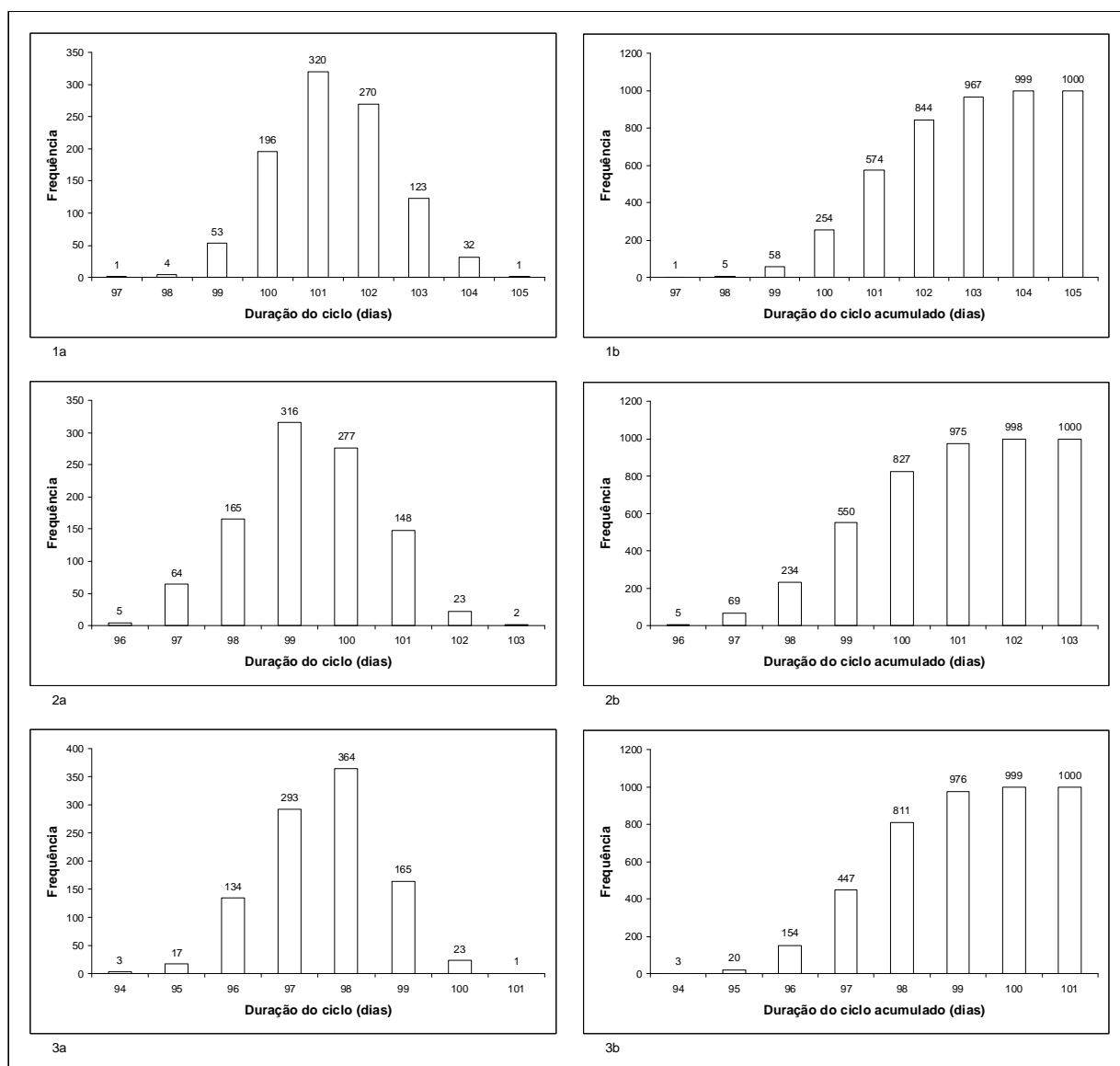


Figura 18 - Duração do ciclo produtivo resultantes do modelo PPDSO para a localidade de Piracicaba (SP) após 1.000 simulações: (a) frequência de resultados de duração do ciclo produtivo; (b) frequência acumulada, (1) semeadura em primeiro de outubro, (2) semeadura em quinze de outubro, (3) semeadura em primeiro de novembro

Na terceira e quarta datas de semeadura (1/10 e 15/10) houve 32 e 31,6% de probabilidade de ocorrência de ciclo de 101 e 99 dias, respectivamente, e 96,7 e 97,5% de probabilidade para duração do ciclo igual ou inferior a 103 e 101 dias, respectivamente.

Nas semeaduras do mês de novembro o resultado foi de 36,4 e 36,9% de probabilidade de ocorrência de ciclo de 98 e 96 dias, respectivamente, e 97,6 e 99,1% de probabilidade para

duração do ciclo igual ou inferior a 99 e 98 dias respectivamente. No mês de dezembro, houve 37,1 e 36,9% de probabilidade de ocorrência de ciclo de 95 dias para ambas as datas de semeadura, e 93,8 e 95% de probabilidade para duração do ciclo igual ou inferior a 96 dias, também para ambas as datas de semeadura.

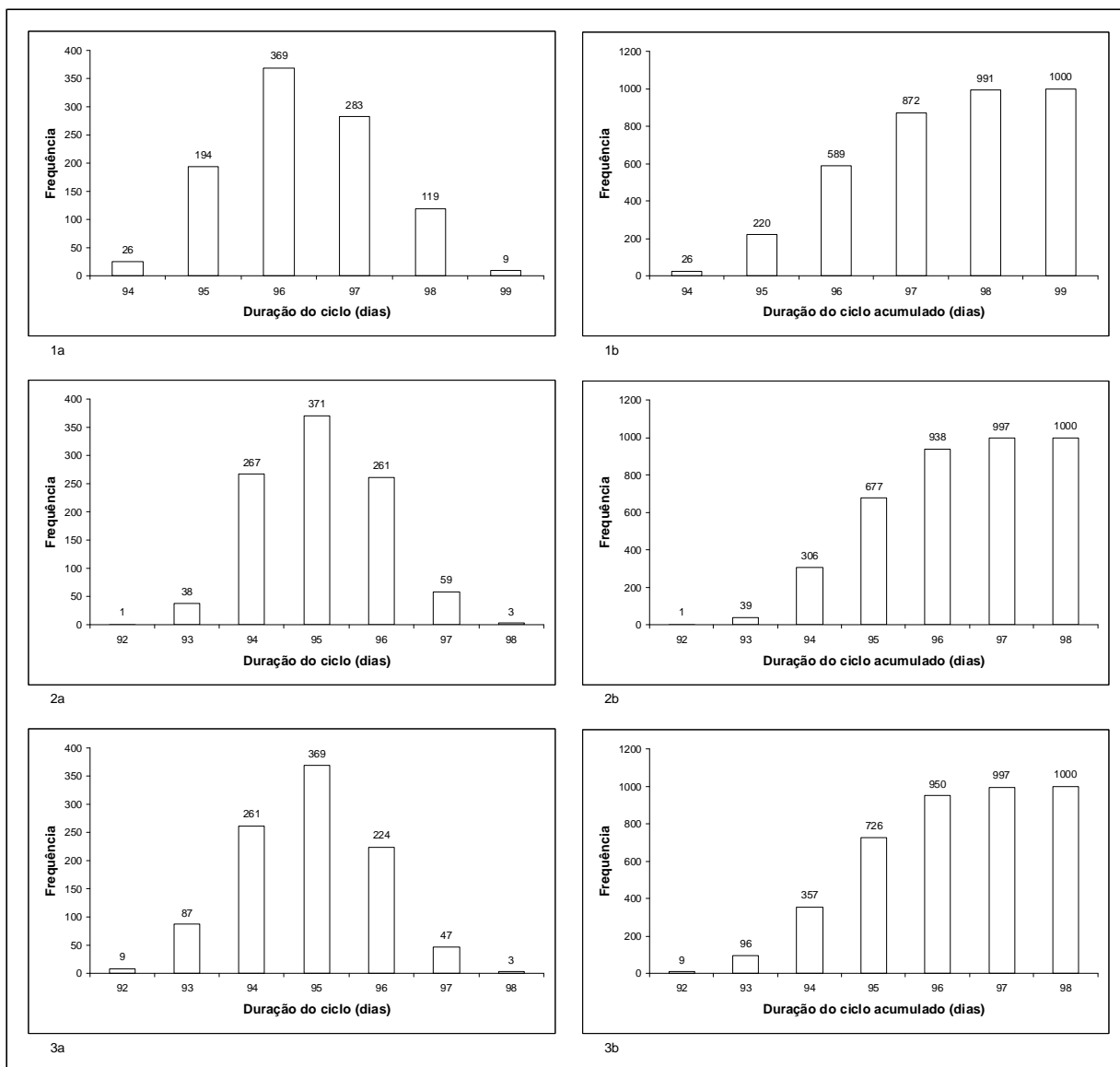


Figura 19 - Duração do ciclo produtivo resultantes do modelo PPDSO para a localidade de Piracicaba (SP) após 1.000 simulações: (a) frequência de resultados de duração do ciclo produtivo; (b) frequência acumulada, (1) semeadura em quinze de novembro, (2), semeadura em primeiro de dezembro, (3) semeadura em quinze de dezembro

4.6 Partição de fotoassimilados

No decorrer das datas de semeadura, a redução no ciclo promovida pelo aumento da temperatura diária também adiantou a partição de fotoassimilados (Figuras 21 e 22). Nas primeiras datas de semeadura, a partição para folhas, raízes e caule atinge período maior que 60 DAS e a partição para órgãos de armazenamento inicia-se a partir dos 50 DAS. Nas últimas datas de semeadura, a partição para folhas, raízes e caule ocorre até os 56 DAS aproximadamente e a partição para órgãos de armazenamento inicia-se a partir dos 40 DAS.

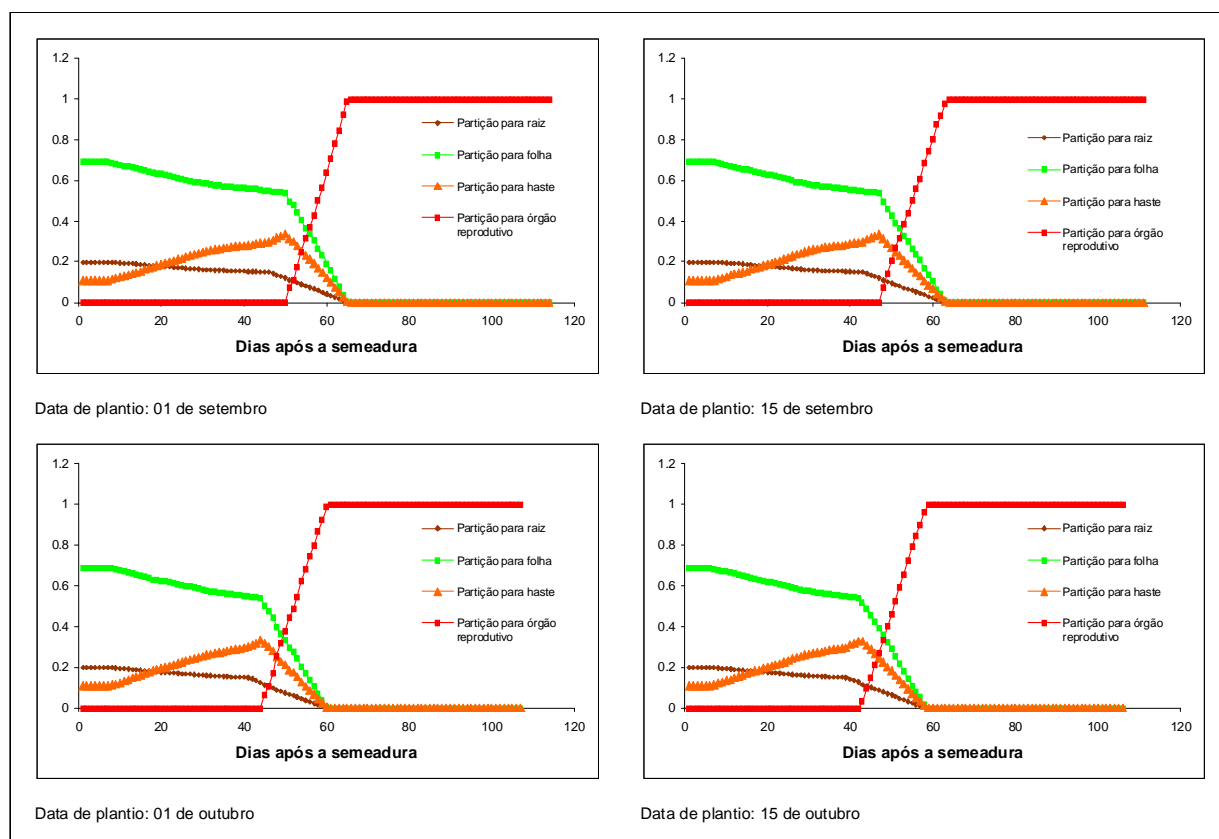


Figura 20 - Partição de fotoassimilados resultantes do modelo PPDSO para a localidade de Piracicaba (SP) em semeaduras efetuadas em setembro e outubro

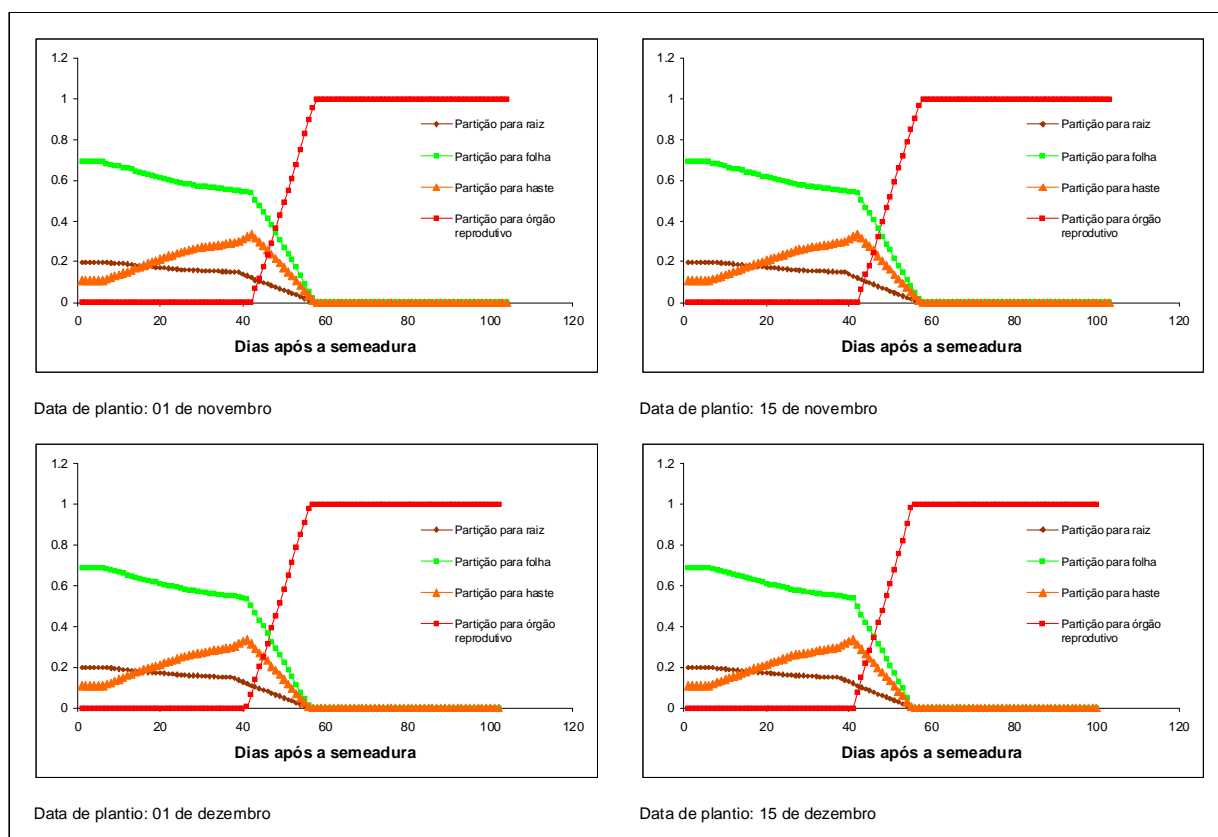


Figura 21 - Partição de fotoassimilados resultantes do modelo PPDSO para a localidade de Piracicaba (SP) em sementeiras efetuadas em novembro e dezembro

4.7 Massa de matéria seca

O acúmulo de matéria seca para os diversos órgãos apresenta comportamento semelhante ao da partição de fotoassimilados. A redução do ciclo promovida pelo aumento da temperatura acelera o acúmulo de matéria seca.

O comportamento do acúmulo de matéria seca é o mesmo para todos os órgãos: a matéria seca de raízes e caule atinge um ponto máximo e estabiliza-se até o final do ciclo; a matéria seca de folhas verdes atinge um ponto máximo e declina com a senescência até chegar à zero no final do ciclo e, a matéria seca dos órgãos reprodutivos inicia seu acúmulo na antese e atinge o ponto máximo ao final do ciclo.

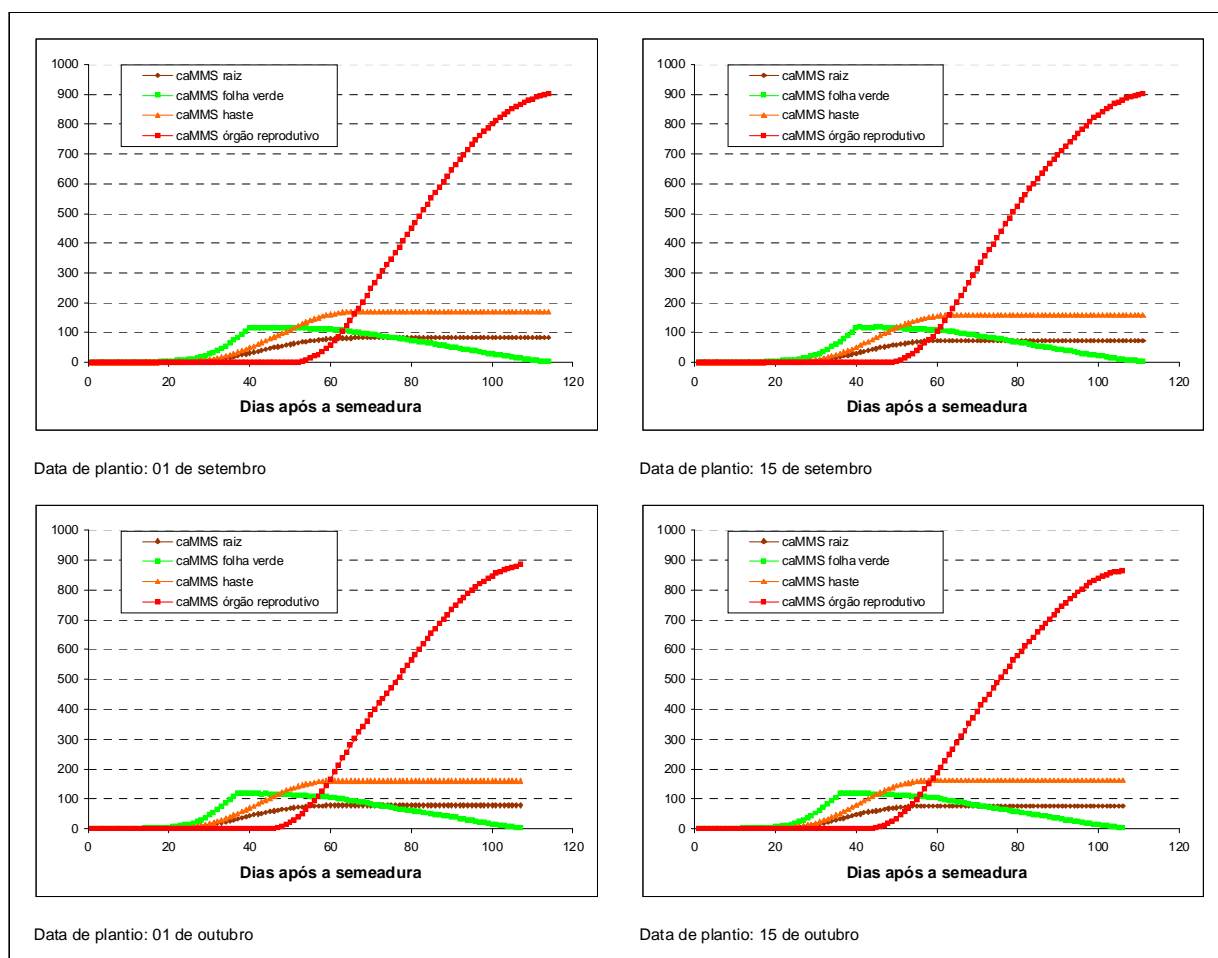


Figura 22 - Massa de matéria seca resultantes do modelo PPDSO para a localidade de Piracicaba (SP) em sementeiras efetuadas em setembro e outubro

A ação do aumento da temperatura ao longo das datas de sementeira faz-se presente na antecipação do ponto máximo de acúmulo de matéria seca e na redução de seu montante. Na primeira sementeira, a matéria seca de raízes e caule atinge o ponto máximo aos 66 DAS e no último, aos 56 DAS. A matéria seca de folhas verdes atinge o ponto máximo aos 41 DAS na primeira sementeira e aos 36 DAS na última. Finalizando, a matéria seca dos órgãos reprodutivos começa seu acúmulo aos 52 DAS e finaliza aos 114 DAS na primeira sementeira e inicia-se aos 43 DAS e finaliza aos 100 DAS na última sementeira. O máximo acúmulo de matéria seca dos órgãos reprodutivos (900 g.m^{-2}) é atingido nas duas primeiras datas e decai abaixo de 800 g.m^{-2} na última data.

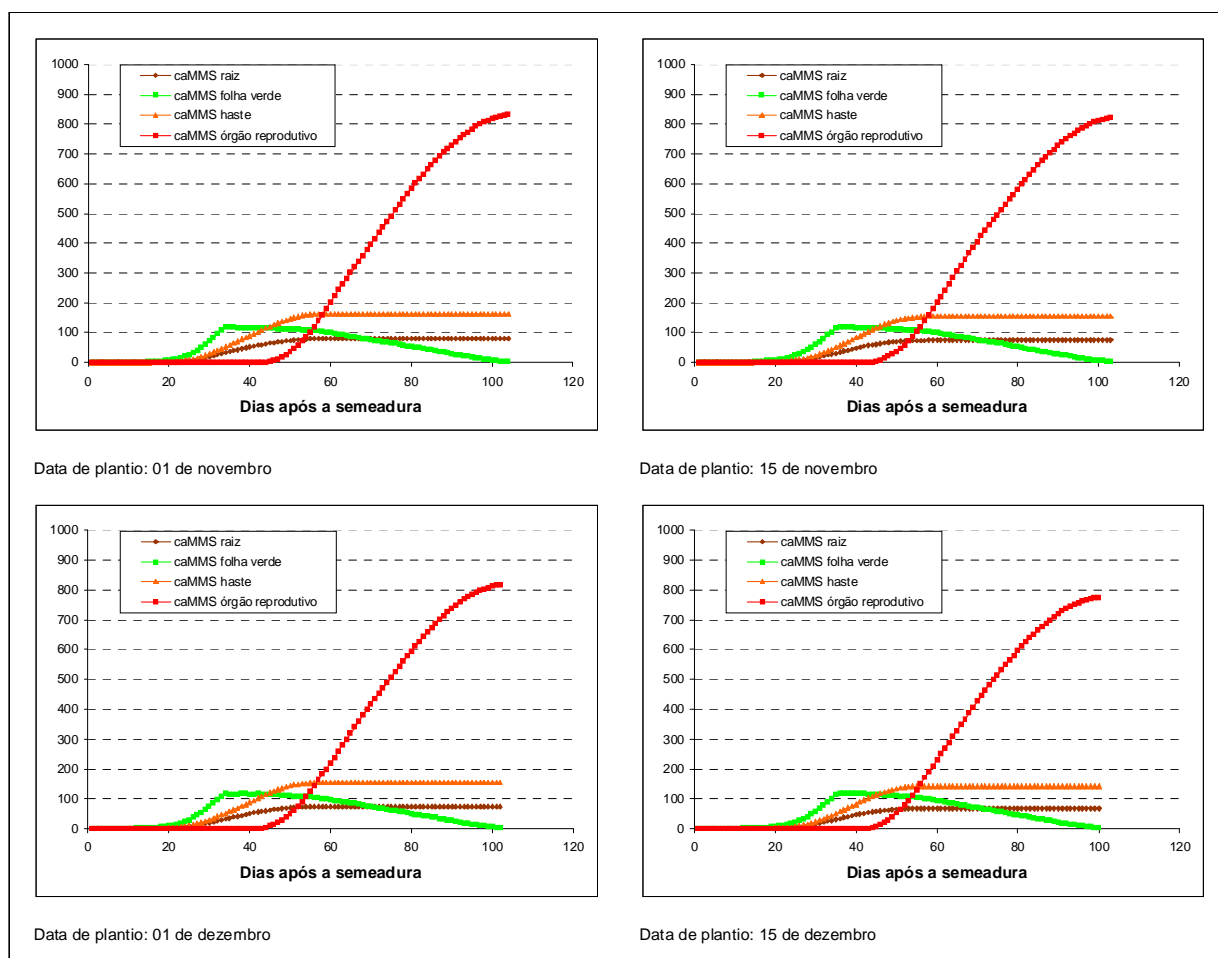


Figura 23 - Massa de matéria seca resultantes do modelo PPDSO para a localidade de Piracicaba (SP) em sementeiras efetuadas em novembro e dezembro

4.8 Produtividade potencial e deplecionada de grãos

Os efeitos maiores da redução do ciclo no transcorrer das datas de sementeira aparecem na produtividade potencial e deplecionada (Figuras 25, 26 e 27). Nas sementeiras ocorridas em setembro, a distribuição da produtividade potencial após mil amostragens (randomizações) resulta em uma amplitude de 6500 a 7000 $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de grãos com 12% de umidade (médias de 6765 e 6700 $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$). Nas sementeiras de dezembro, essa amplitude cai para 5700 a 6000 $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ (médias de 5974 e 5866 $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$), uma redução percentual de 13,3% ou de 899 $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$. O mesmo ocorre com a produtividade deplecionada que, nas primeiras sementeiras, tem amplitude entre 4300 e 4500

kg.ha⁻¹ (médias de 4397 e 4354 kg.ha⁻¹) e reduz-se, nas semeaduras de dezembro, para amplitude de 3700 a 3900 kg.ha⁻¹ (médias de 3883 e 3813 kg.ha⁻¹), decaindo 584 kg.ha⁻¹.

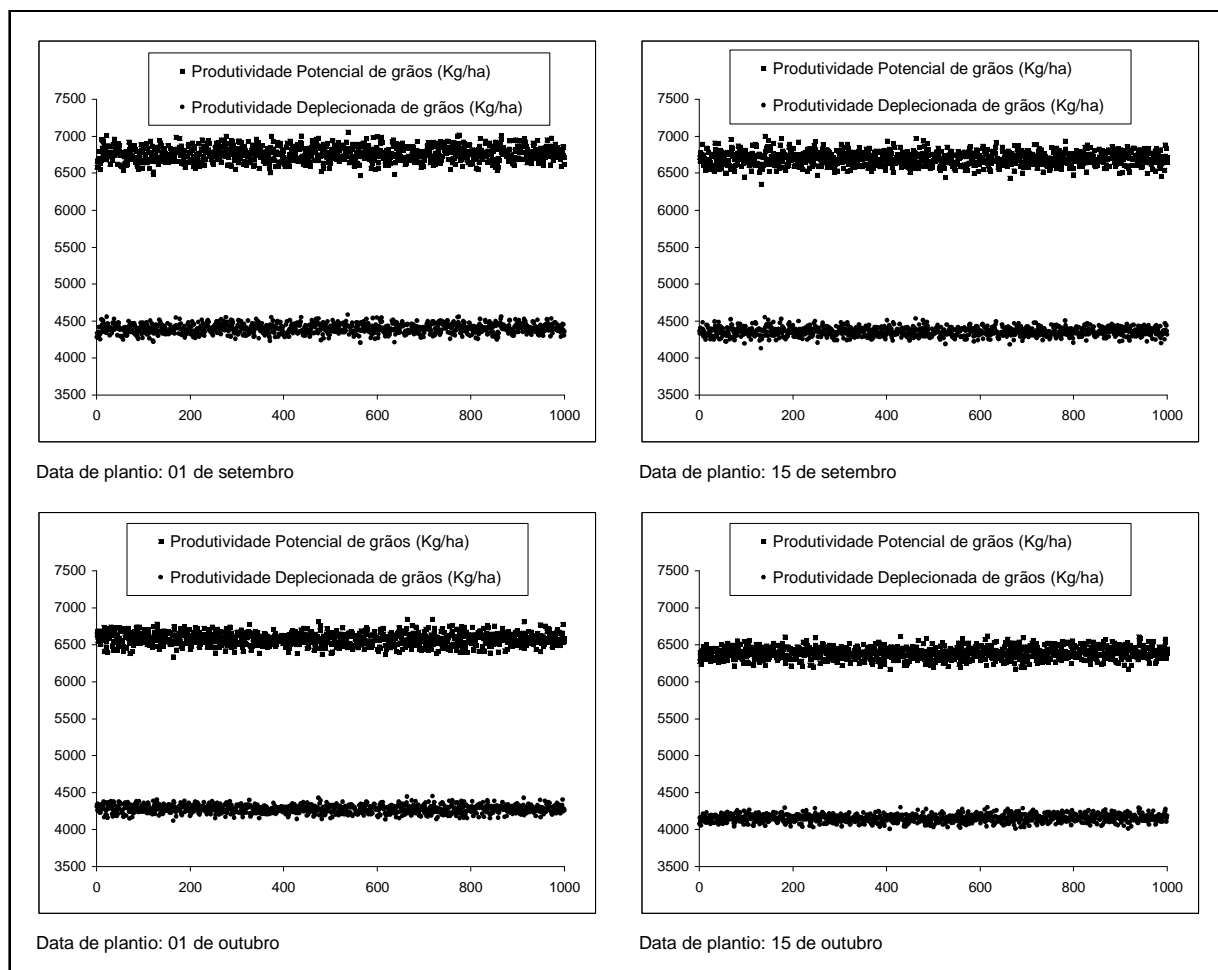


Figura 24 - Distribuição da produtividade potencial e deplecionada resultantes do modelo PPDSO para a localidade de Piracicaba (SP) em semeaduras efetuadas em setembro e outubro, após mil simulações

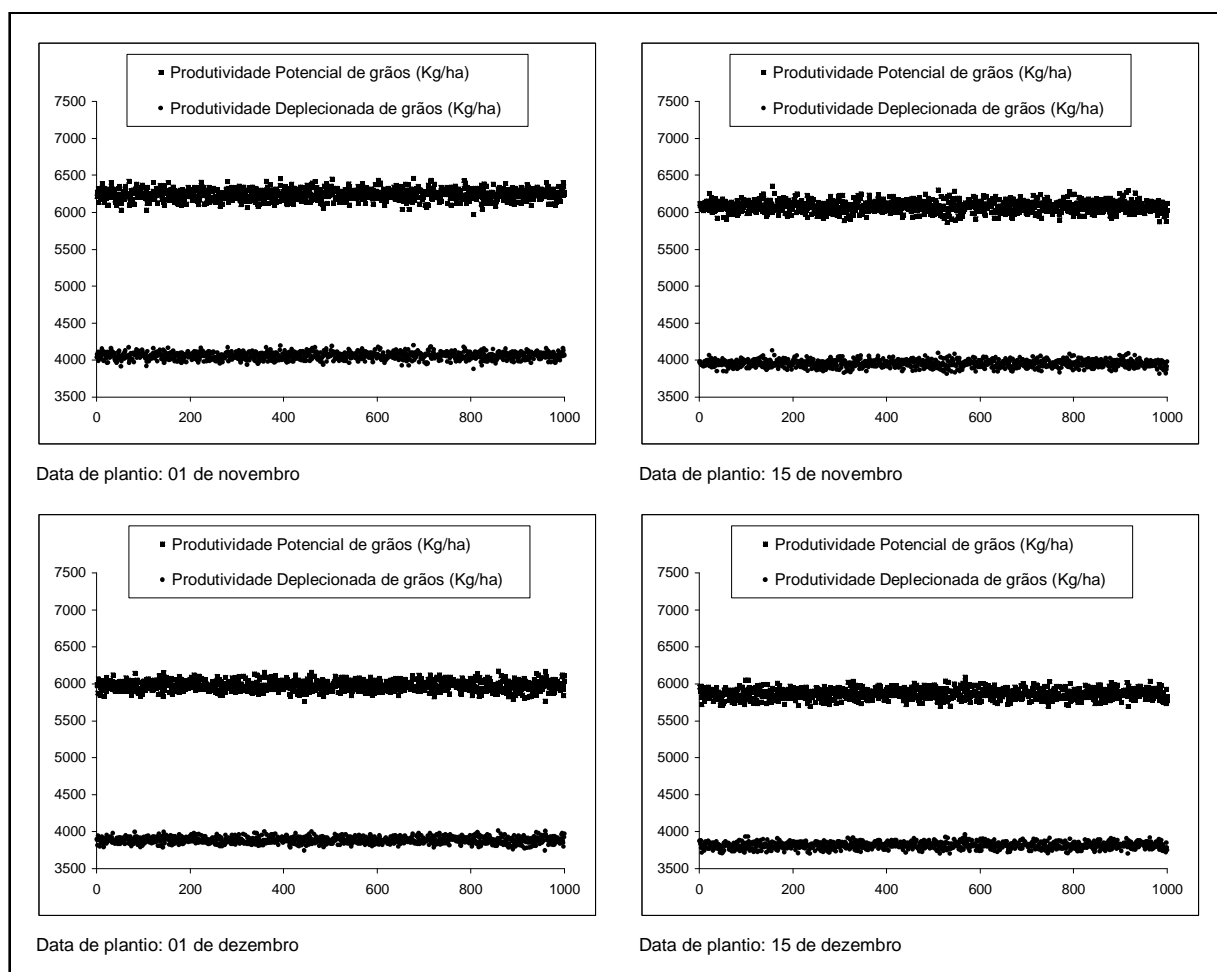


Figura 25 - Distribuição da produtividade potencial e deplecionada resultantes do modelo PPDSO para a localidade de Piracicaba (SP) em semeaduras efetuadas em novembro e dezembro, após mil simulações

Na figura 27 podemos visualizar médias das produtividades potencial e deplecionada. Os melhores resultados de ambas as produtividades ocorrem na primeira data de semeadura e decaem até a última, com o mesmo comportamento, devido à produtividade deplecionada ser um percentual da potencial.

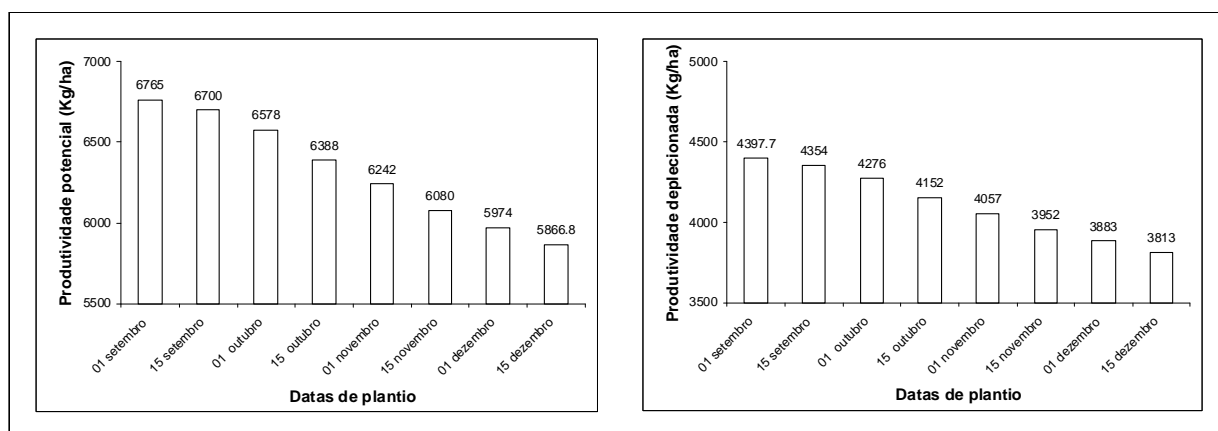


Figura 26 - Médias das produtividades potencial e deplecionada de grãos resultantes do modelo PPDSO para a localidade de Piracicaba (SP)

Apresentadas as produtividades de grãos resultantes da simulação, é importante demonstrar o efeito da EUR nos resultados. Conforme descrito no item 3.1.1.5 o valor de $2,3 \text{ g.MJ}^{-1}$ foi utilizado. Para comparativo, simulou-se o modelo com outros três valores de EUR encontrados na literatura. O resultado para a primeira data de semeadura pode ser visualizado na Figura 28.

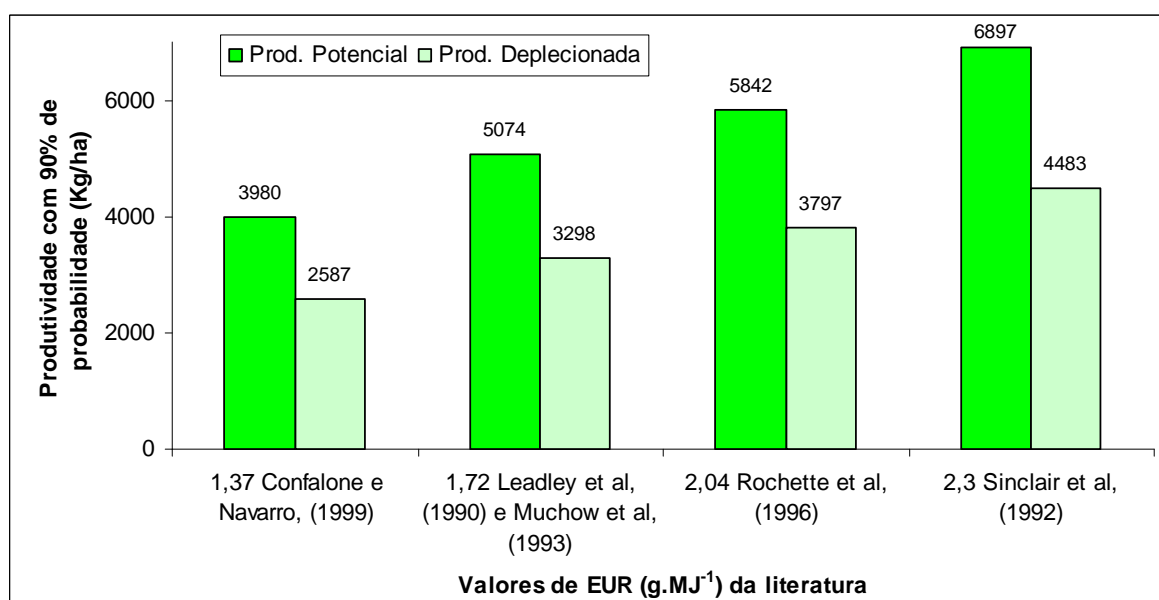


Figura 27 - Produtividades potencial e deplecionada resultantes do modelo PPDSO com diferentes valores de EUR (g.MJ^{-1}) encontrados na literatura e semeadura em primeiro de setembro para a localidade de Piracicaba (SP)

Com o uso combinado do valor da EUR e do fator de depleção, pode-se aproximar o valor obtido nas simulações com a realidade de campo, de cada região. Altas produtividades reais obtidas a campo por agricultores têm patamares de 3300 a 3600 quilos por hectare. Alteração no modelo para uso de EUR igual a 1,72 traria resultados condizentes com esta realidade.

No decorrer das datas de plantio, não houve somente o efeito do aumento da temperatura média na queda da produtividade via redução do ciclo (Figura 29 - gráficos a e b), houve também efeito da radiação global. O gráfico (c) da Figura 29 demonstra que a produtividade não teve correlação com a radiação global média ocorrida em toda duração do ciclo, mas quando se verifica a média da radiação global nos 30 dias após a antese há correlação com a produtividade.

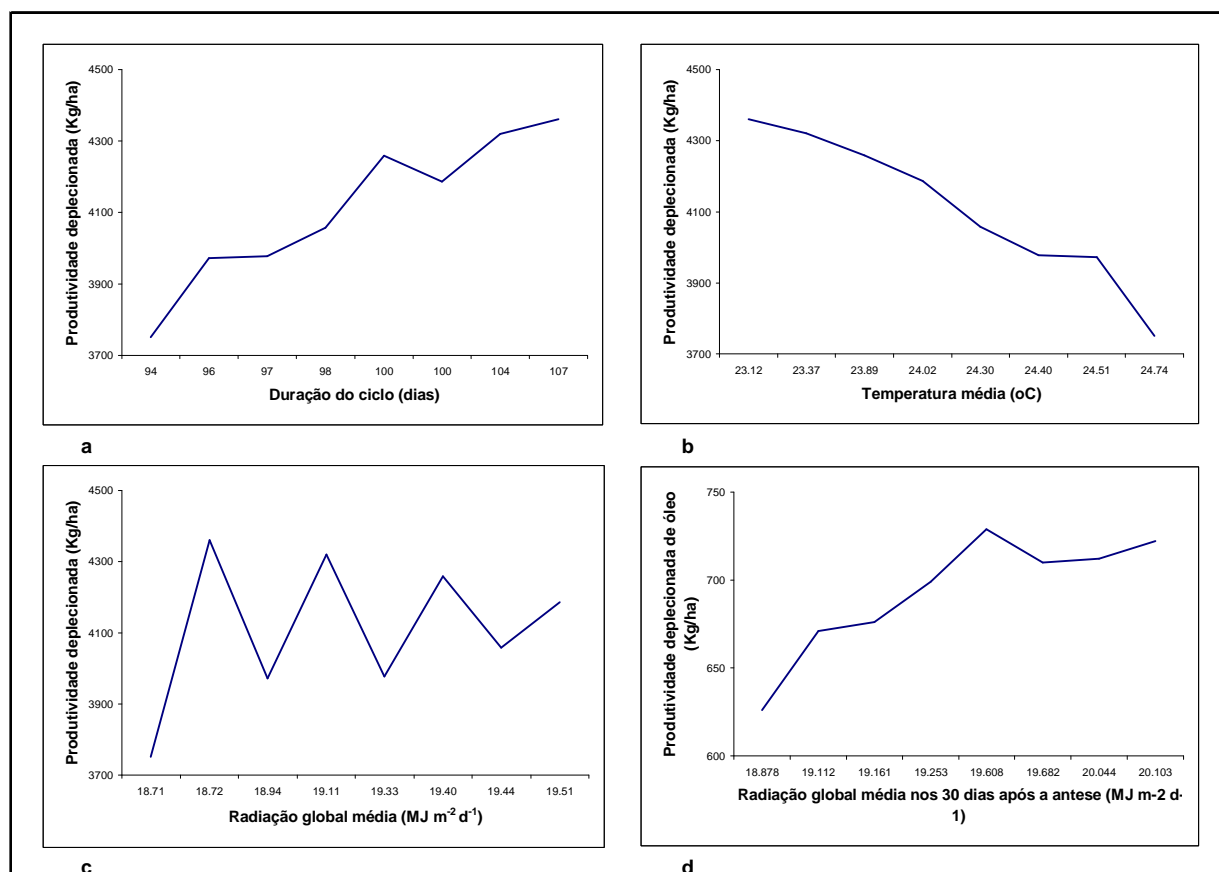


Figura 28 - Produtividade deplecionada de grãos resultantes do modelo PPDSO para a localidade de Piracicaba (SP), relacionados à: (a) duração do ciclo; (b) temperatura média durante o ciclo; (c) radiação global média durante o ciclo e; (d) radiação global média durante os 30 dias após a antese

4.9 Produtividade e teor de óleo

A produtividade de óleo, após randomização simulada pelo modelo PPDSO, tem valores decrescentes à medida que as datas de semeadura aproximam-se do final do ano (Figuras 30, 31 e 32). Da semeadura simulada em primeiro de setembro até a última data, as produtividades de óleo médias decaem de 742,7 para 643,7 litros por hectare, respectivamente. Redução de 99 litros por hectare ou 13,33% em relação à maior produtividade.

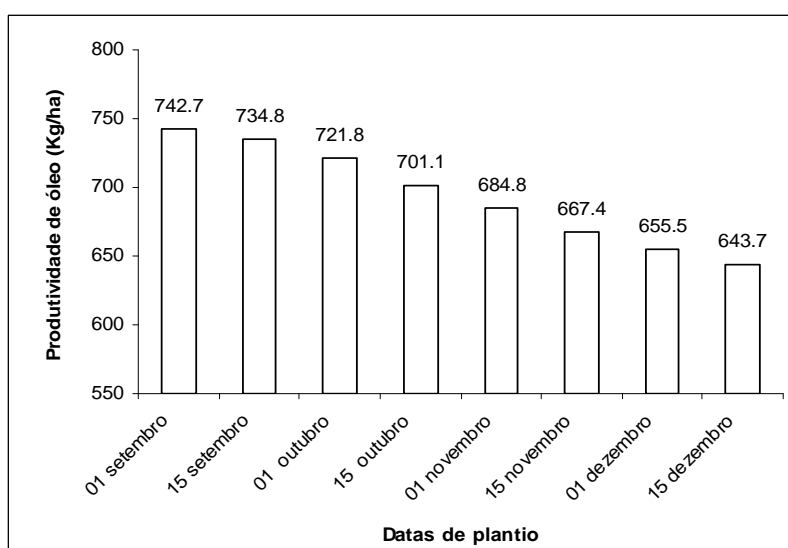


Figura 29 - Produtividade potencial de óleo média resultante do modelo PPDSO para a localidade de Piracicaba (SP)

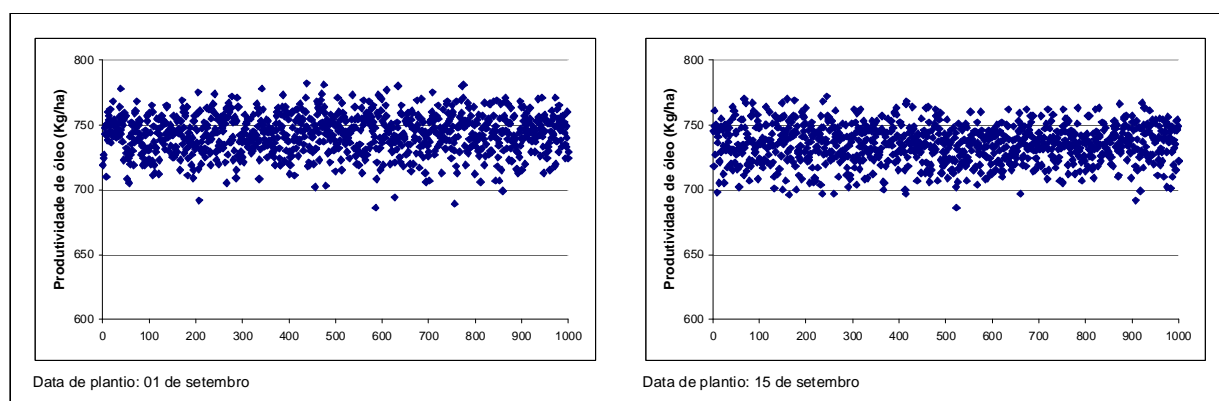


Figura 30 - Distribuição da produtividade potencial de óleo resultantes do modelo PPDSO para a localidade de Piracicaba (SP) em semeaduras efetuadas em setembro, após mil simulações

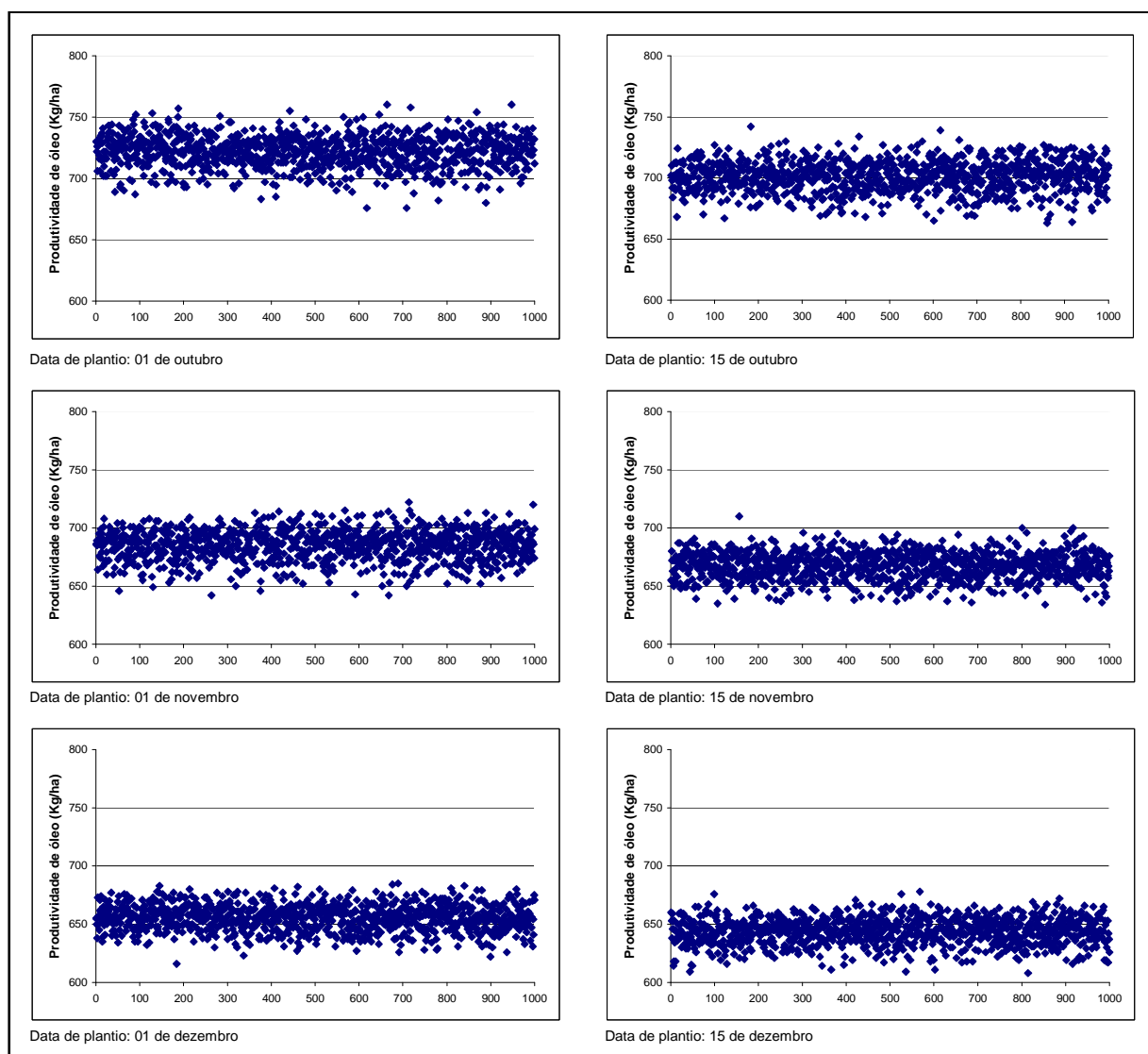


Figura 31 - Distribuição da produtividade potencial de óleo resultantes do modelo PPDSO para a localidade de Piracicaba (SP) em sementeiras efetuadas em outubro e novembro e dezembro, após mil simulações

A randomização para os teores de óleo, com limites inferior e superior de 18,05 e 20,9%, gerou resultados com frequências próximas a 70% para a amplitude de 19,0 a 19,5% de concentração de óleo como pode ser observado nas Figuras 33, 34 e 35.

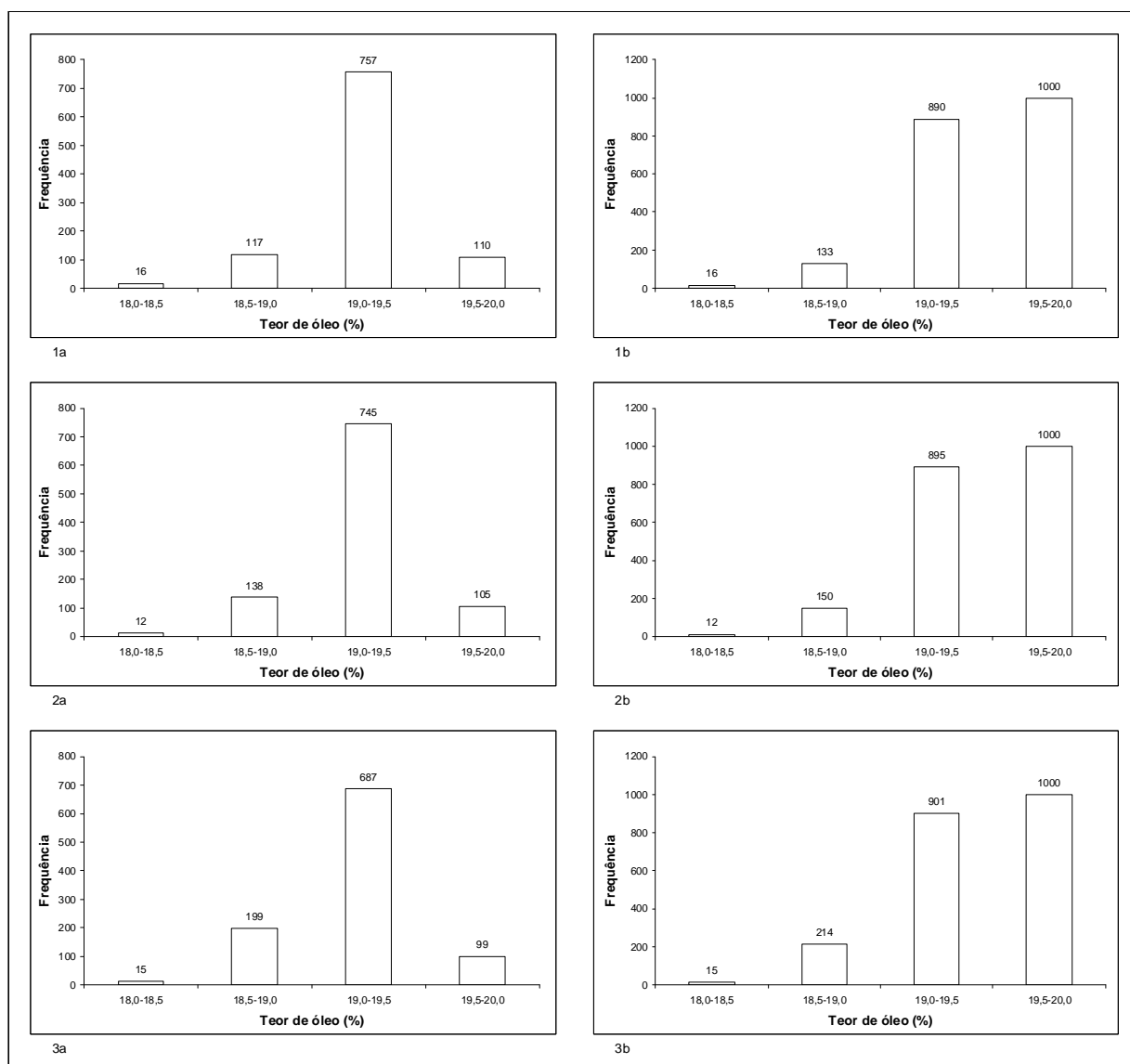


Figura 32 - Teor de óleo resultantes do modelo PPDSO para a localidade de Piracicaba (SP) após mil simulações: (a) frequência de resultados de teor de óleo; (b) frequência acumulada, (1) semeadura em primeiro de setembro, (2) semeadura em quinze de setembro, (3) semeadura em primeiro de outubro

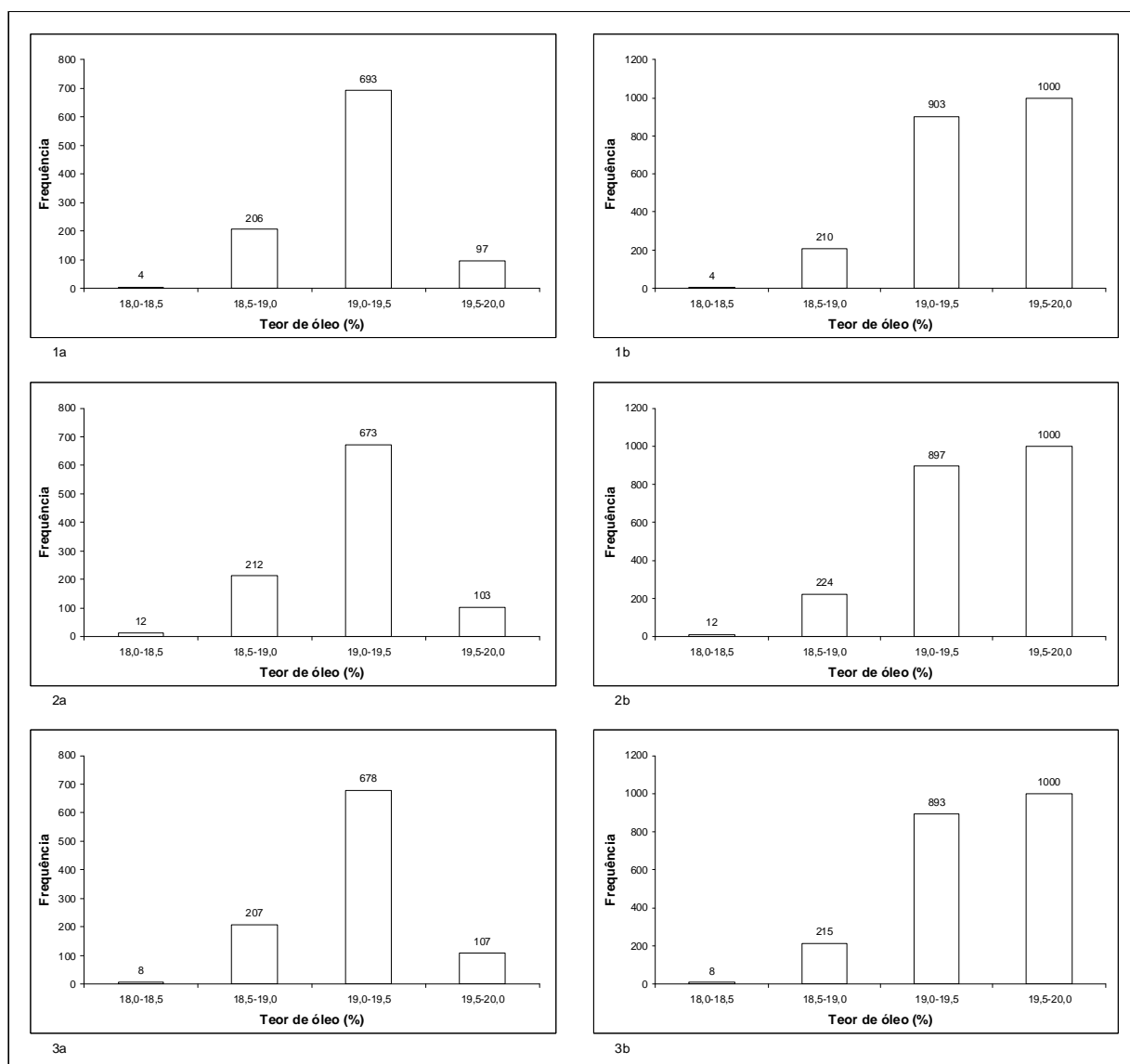


Figura 33 - Teor de óleo resultantes do modelo PPDSO para a localidade de Piracicaba (SP) após mil simulações: (a) frequência de resultados de teor de óleo; (b) frequência acumulada, (1) semeadura em quinze de outubro, (2) semeadura em primeiro de novembro, (3) semeadura em quinze de novembro

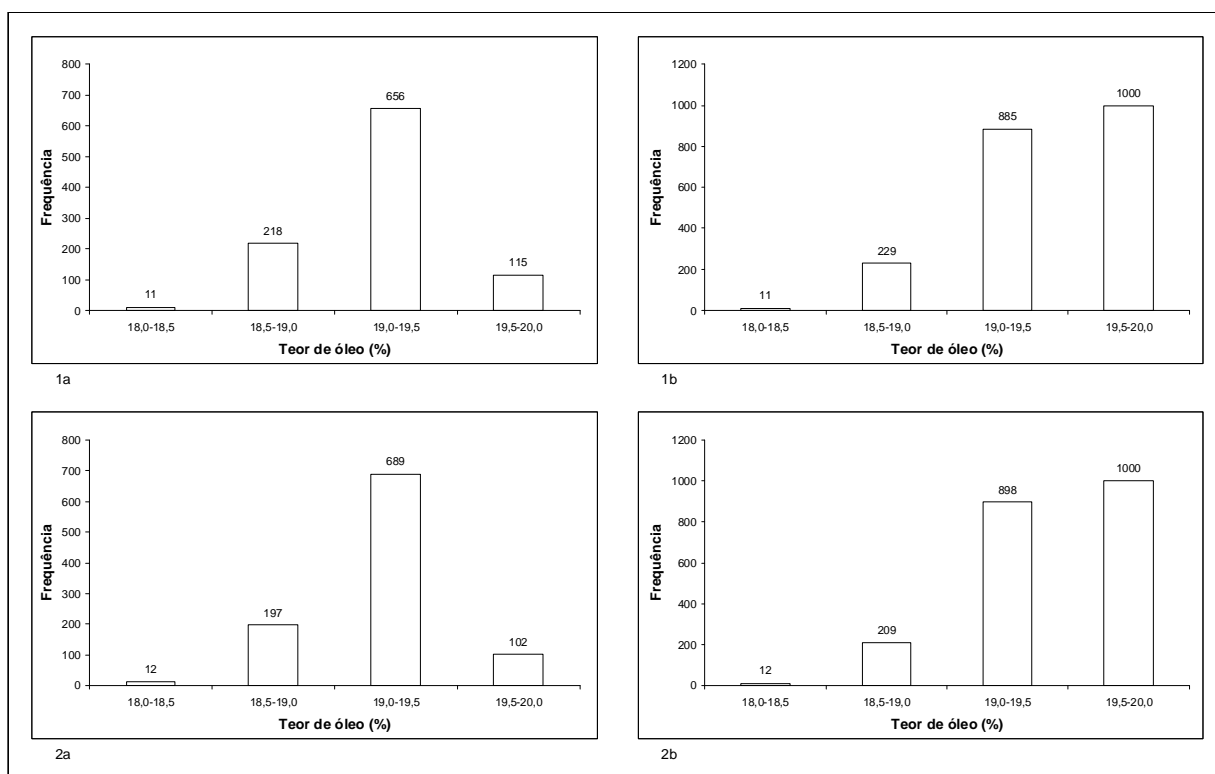


Figura 34 - Teor de óleo resultantes do modelo PPDSO para a localidade de Piracicaba (SP) após mil simulações: (a) frequência de resultados de teor de óleo; (b) frequência acumulada, (1) semeadura em primeiro de dezembro, (2) semeadura em quinze de dezembro

5 CONCLUSÕES

Dentre os parâmetros climáticos usados neste estudo, a temperatura foi determinante na duração do ciclo da cultura, o qual decresceu da primeira à última data de semeadura conforme aumento da temperatura média. Esta redução do ciclo interferiu nas produtividades de grãos e de óleo de soja, também decrescentes da primeira à última data de semeadura.

A radiação global, quando considerada sua média durante o ciclo, não teve correlação com as produtividades de grãos e de óleo, mas quando avaliada nos trinta dias após a antese, interferiu positivamente nestes resultados. Os altos valores de RFA interceptada após a antese refletiram-se na partição de fotoassimilados e, conseqüentemente, na produtividade de grãos e óleo, nesta simulação.

Considerando os dados de temperatura e radiação global históricos de Piracicaba-SP e as demais necessidades ecofisiológicas ótimas para a cultura, os resultados de produtividade definem como melhor período para plantio de soja o mês de setembro.

Os tratamentos estatísticos estocásticos de distribuição normal truncada para os dados de temperatura e, de distribuição triangular assimétrica para teores de óleo, podem ser utilizados para a previsão das produtividades de soja e óleo, respectivamente.

O modelo PPDSO pode ser usado como estimador da produtividade potencial de grãos e de óleo de soja. Este modelo, **inclusas as equações pertinentes**, permite também simular produtividades em condições de estresse por déficit hídrico, perda de área foliar por incidência de doenças e pragas ou competição com plantas daninhas. Estudos que futuramente podem ser realizados, mas necessitam de aferição com dados de campo, devido o modelo apresentar como limitações pouca bibliografia sobre partição de fotoassimilados e eficiência de uso da radiação, também importantes sugestões de novos estudos.

REFERÊNCIAS

- AINSWORTH, E.A.; ROGERS, A.; LEAKEY, A.D.B.; HEADY, L.E.; GIBON, Y.; STITT, M.; SCHURR, V. Does elevated atmospheric [CO₂] alter diurnal C uptake and the balance of C and N metabolites in growing and fully expanded soybean leaves? **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 58, p.579-591, 2007.
- AMARAL, D.F. Desmistificando o Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel - A visão da indústria brasileira de óleos vegetais. 2009. São Paulo: ABIOVE, 2009. Disponível em: < http://www.abiove.com.br/palestras/abiove_relatorio_biodiesel_ago09_br.pdf >. Acesso em: 27 ago 2009.
- AMARAL, D.F. Panorama do mercado de oleaginosas - aproveitamento para produção de óleo e derivados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MAMONA, 4.; SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE OLEAGINOSAS ENERGÉTICAS, 1., 2010, João Pessoa. **Palestras...** João Pessoa: ABIOVE, 2010. Disponível em: < http://abiove.com.br/palestras/abiove_pal_oleaginosas_cong9jun10.pdf >. Acesso em: 05 ago. 2010.
- ASSIS, J.P. **Modelo estocástico para estimação de produtividade potencial de milho em Piracicaba-SP** 2004. 168 p. Dissertação (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.
- AZAM-ALI, S.N.; CROUT, N.M.J.; BRADLEY, R.G. Perspectives in modeling resource capture by crops. In: MONTEITH, J.L.; SCOTT, R.K.; UNSWORTH, M.H. (Ed.). **Resource capture by crops**. Nottingham: Nottingham University Press, 1994. p.125-148.
- BASTIDAS, A.M.; SETIYONO T.D.; DOBERMANN A.; CASSMAN K.G.; ELMORE R.W.; GRAEF G.L.; SPECHT J.E. Soybean sowing date: The vegetative, reproductive, and agronomic impacts. **Crop Science**, Madison, v.48, p.727-740, 2008.
- BEGONIA, G.B.; HESKETH, J.D.; FREDERICK, J.R.; FINKE, R.L.; PETTIGREW, W.T. Factors affecting leaf duration in soybean and maize. **Photosynthetica**, Praha, v.21, p.285, 1987.
- BOARD, J.E.; HARVILLE, B.G. Explanation for greater light interception in narrow-vs. Wide-row. **Crop Science**, Madison, v.32, p.198-202, 1992.
- BOARD, J.E.; HARVILLE, B.G.; KAMAL, M. Radiation-use efficiency in relation to row spacing for late-planted soybean. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.36, p.13-19, 1994.
- BOARD, J.E.; MARICHERLA, D. Explanation for decreased harvest index with Increased yield in soybean. **Crop Science**, Madison, v.48, p.1995-2002, 2008.
- BOONS-PRINS, E.R.; KONING D.E., 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. (CABO-TT, 32).

BRASIL. Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética, **Plano Decenal de Expansão de Energia 2008/2017**. Rio de Janeiro: EPE, 2009. 435 p. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/PDEE/Forms/EPEEstudo.aspx> >. Acesso em: 5 ago. 2009.

BRESSAN, G. **Modelagem e simulação de sistemas computacionais**. São Paulo; Larc-PCS/EPUSP, IME/USP, 2002. 12p.

CÂMARA, G.M.S. **Efeito do fotoperíodo e da temperatura no crescimento, florescimento e maturação de cultivares de soja (*Glycine max* (L.) Merrill)**. 1991. 266 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1991.

CASAROLI, D.; FAGAN, E.B.; SIMON, J.; MEDEIROS, S.P.; MANFRON, P.A.; DOURADO-NETO, D. ; VAN LIER, Q.J.; MULLER, L.; MARTIN, T.N. Solar radiation and physiologic aspects in soybean - a review. **Revista da FZVA**, Uruguaiana, v. 14, p.102-120, 2007.

CONFALONE, A.; NAVARRO, M.D. Influência do “déficit” hídrico sobre a eficiência da radiação solar em soja. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v.5, n.3, p.195-198, 1999.

COOPER, R.L. A delayed flowering barrier to higher soybean yields. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.82, p.27-35, 2003.

CORRÊA, S.T.R. **Avaliação do modelo LINTUL (Light Interception and Utilization) para estimação da produtividade potencial da cultura da soja** 2008. 88 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

COSTA, J.A. **Cultura da Soja**. Porto Alegre. Evangraf. 1996. 233p.

CREGAN, P.B.; HARTWIG, E.E. Characterization of flowering response to photoperiod in diverse soybean genotypes. **Crop Science**, Madison, v.24, p.659-662, 1984.

DAUGHTRY, C.S.T.; GALLO, K.P.; GOWARD, S.N.; PRINCE, S.D.; KUSTAS, W.P. Spectral estimates of absorbed radiation and phytomass production in corn and soybean canopies. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 39, p.141-152, 1992.

DORNBOS, D.L.J.; MULLEN, R.E. Soybean seed protein and oil contents and fatty acid composition adjustments by drought and temperature. **Journal of American Chemical Society**, New York, v. 69, p.228-231, 1992.

EMBRAPA. **Tecnologias de Produção Soja, Região Central do Brasil 2003**. Sistemas de Produção 1, ISSN versão eletrônica. Não paginado. Disponível em: <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Soja/SojaCentralBrasil2003/exigencias.htm> >. Acesso em: 17 mar. 2009.

EMBRAPA. **Ata da XII Reunião de Pesquisa de Soja da Região Central do Brasil** - 2004. Londrina: Embrapa Soja: Fundação Meridional, 2004. 272 p. (Documentos/ Embrapa Soja, 38).

EMBRAPA. **Tecnologias de Produção de Soja - Região Central do Brasil - 2006**. Londrina: Embrapa Soja: Embrapa Cerrados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2005. 220 p. (Sistemas de Produção/ Embrapa Soja, 9).

EMBRAPA SOJA, ISSN 1516-7860 versão eletrônica. **Circular Técnica 51**, Instalação da lavoura de soja: época, cultivares, espaçamento e população de plantas. Londrina. 2007a. Disponível em: <<http://www.cnpso.embrapa.br/download/cirtec/cirtec51.pdf>>. Acesso em: 30 mai. 2010.

EMBRAPA SOJA, ISSN 1516-7860 versão eletrônica. **Circular Técnica 48**, Ecofisiologia da soja. Londrina. 2007b. Disponível em: <<http://www.cnpso.embrapa.br/download/cirtec/cirtec48.pdf>>. Acesso em: 30 mai. 2010.

ESTADOS UNIDOS. Department of Agriculture. **Oilseeds: World Markets and Trade**. October, 2009a. 33 p. (USDA, Circular Series, FOP 10-09). Disponível em: <<http://www.fas.usda.gov/oilseeds/circular/Current.asp>>. Acesso em: 2 nov. 2009.

ESTADOS UNIDOS. Department of Agriculture. **Oilseeds: World Markets and Trade**. November, 2009b. 33 p. (USDA, Circular Series, FOP 11-09). Disponível em: <<http://www.fas.usda.gov/oilseeds/circular/Current.asp>>. Acesso em: 15 nov. 2009.

ESTADOS UNIDOS. Department of Agriculture. **Table 07: Soybeans: World Supply and Distribution**, 2009c. 2 p. (USDA) Disponível em: <<http://www.fas.usda.gov/psdonline/psdHome.aspx>>. Acesso em: 24 out. 2009.

ESTADOS UNIDOS. Department of Agriculture. **Table 08: Soybean Meal: World Supply and Distribution**, 2009d. 2 p. (USDA). Disponível em: <<http://www.fas.usda.gov/psdonline/psdHome.aspx>>. Acesso em: 24 out. 2009.

ESTADOS UNIDOS. Department of Agriculture. **Table 09: Soybean Oil: World Supply and Distribution**, 2009e. 2 p. (USDA). Disponível em: <<http://www.fas.usda.gov/psdonline/psdHome.aspx>>. Acesso em: 24 out. 2009.

FEHR, W.R.; CAVINESS, C.E. **Stages of soybean development**. Iowa: Agricultural Experimental Station, 1977. 81 p.

FOROUD, N.; H.H. MUNDEL; G. SAINDON; T. ENTZ. Effect of level and timing of moisture stress on soybean yield, protein, and oil responses. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.31, p.195-209, 1993.

GARNER, W.W.; ALLARD, H.A. Photoperiodic response of soybeans in relation to temperature and other environmental factors. **Journal of Agricultural Research**, Washington, v.41, p.719-735, 1930.

GIBSON, L.R.; MULLEN, R.E. Soybean seed composition under high day and night growth temperatures. **Journal of American Chemical Society**, New York, v.73, p.733-737, 1996.

GOUDRIAAN, J.; VAN LAAR, H.H. **Modelling potential crop growth processes**: textbook with exercises. Amsterdam: Kluwer Academic Press, 1994. 238 p.

GRIMM, S.S.; JONES, J.W.; BOOTE, J.K.; HESKETH, J.D. Parameter estimation for predicting flowering dates of soybean cultivars. **Crop Science**, Madison, v.33, p.137-144, 1993. Abstract.

HARTWIG, E.E. Varietal development. In: CALDWELL, B.E. (Ed.). Soybeans: improvement, production and uses. **American Society of Agronomy**, 1973. p.182-210.

HEINEMANN, A.B.; MAIA, A. de H.N.; DOURADO-NETO, D.; INGRAN, K.T.; HOOGENBOOM, G. Soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) growth and development response to CO₂ enrichment under different temperature regimes. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v.24, p.52-61, 2006.

HESKETH, J.D.; MYHRE, D.L.; WILLEY, C.R. Temperature control of time intervals between vegetative and reproductive events in soybeans. **Crop Science**, Madison, v.13, p.250-254, 1973.

HOFSTRA, G. Response of soybeans to temperature under high light intensities. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, v.52, p.535-543, 1972.

HUANG, L.F.; ZHENG, J.H.; ZHANG Y.Y.; HU, W.H.; MAO, W.H.; ZHOU, Y.H.; YU, J.Q. Diurnal Variations in Gas Exchange, Chlorophyll Fluorescence Quenching and Light Allocation in Soybean Leaves. The Cause of Midday Depression CO₂ Assimilation. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v.110, p.214-218, 2006.

INAMULLAH; ISODA, A. Adaptive responses of soybean and cotton to water Stress II. Changes in CO₂ assimilation rate, Chlorophyll fluorescence and photochemical reflectance index in relation to leaf temperature. **Plant Production Science**, Tokyo, v.8, p.131-138, 2005.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão, Produção agrícola municipal - culturas temporárias e permanentes. Rio de Janeiro: IBGE, 2003, v.30, p.1-91. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/pam/2003/pam2003.pdf> >. Acesso em: 19 dez. 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão, Produção agrícola municipal - culturas temporárias e permanentes. Rio de Janeiro: IBGE, 2004, v.31, p.1-133. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/pam/2004/pam2004.pdf> >. Acesso em: 19 dez. 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão, Produção agrícola municipal - culturas temporárias e permanentes. Rio de Janeiro: IBGE, 2005, v.32, p.1-101. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/pam/2005/pam2005.pdf> >. Acesso em: 19 dez. 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão, Produção agrícola municipal - culturas temporárias e permanentes. Rio de Janeiro: IBGE, 2006, v.33, p.1-133. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/pam/2006/pam2006.pdf> >. Acesso em: 19 dez. 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão, Produção agrícola municipal - culturas temporárias e permanentes. Rio de Janeiro: IBGE, 2007, v.34, p.1-69. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/pam/2007/pam2007.pdf> >. Acesso em: 17 mar. 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão, Produção agrícola municipal - culturas temporárias e permanentes. Rio de Janeiro: IBGE, 2008, v.35, p.1-93. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/pam/2008/pam2008.pdf> >. Acesso em: 17 mar. 2010.

JEFFERS, D.L.; SHIBLES, R.M. Some effects of leaf area, solar radiation, air temperature, and variety on net photosynthesis in field-grown soybeans. **Crop Science**, Madison, v.9, p.762-764, 1969.

JEPPSON, R.G.; JOHONSON, R.R.; HADLEY, H.H. Variation of plant nitrogen to the grain in nodulating and non-nodulating soybean genotypes. **Crop Science**, Madison, v.18, p.1058-1062. 1978.

KANE, M.V.; STEELE, C.C.; GRABAU, L.J.; MACKOWN, C.T.; HILDEBRE, D.F. Early-maturing soybean cropping system: III. Protein and oil contents and oil composition. **Agronomy Journal**, Madison, v.89, p.464-469, 1997.

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.

LEADLEY, P.W.; REYNOLDS, J.F.; FLAGLER, R.; HEAGLE, A.S. Radiation utilization efficiency and the growth of soybeans exposed to ozone: A comparative analysis. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.51, p.293-308, 1990.

LÖVENSTEIN, H.; LANTINGA, E.A.; RABBINGE, R.; VAN KEULEN, H. Principles of Production Ecology. Wageningen: Syllabus of Chair Group Theoretical Production Ecology, 1995. 121 p.

LUGG, D.G.; SINCLAIR, T.R. A survey of soybean cultivars for variability in specific leaf weight. **Crop Science**, Madison, v.19, p.887-892, 1979.

MAIA, A. H. N. **Modelagem da evolução da resistência de pragas a toxinas Bt expressas em culturas transgênicas: quantificação de risco utilizando análise de incertezas** 2003. 108 p. Dissertação (Doutorado em Agronomia, área de concentração: Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

MARCOS FILHO, J. **Produção de sementes de soja**. Campinas Fundação Cargill 1987. 86 p.

MARIN, F. **Apostila da Disciplina 00874 - Clima e Ambiente**. Campinas: Pontifícia Universidade Católica de Campinas, 2009. 79 p.

MARTIN, T.N. **Modelo estocástico para estimação da produtividade de soja no Estado de São Paulo utilizando simulação normal bivariada** 2007. 208 p. Dissertação (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

MAYERS, J.D.; LAWN, R.J.; BYTH, D.E. Adaption of soybean [*Glycine max* (L.) Merrill] to the dry season of the tropics. I. Genotypic and environmental effects on phenology. **Australian Journal of Agricultural Research**, East Melbourne, v. 42, p.497-515, 1991.

MICHIGAN STATE UNIVERSITY EXTENSION. **Soybean growth & development**. Set.2005. Disponível em:< <http://www.msue.msu.edu/portal/>>. Acesso em: 28 set. 2008

MIYASAKA, S. **A Soja no Brasil**. [s.l.]:[s.n.] 1981. 1062 p.

MONTEITH, J.L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. **Journal of Applied Ecology**, London, v.9, p.747-766, 1972.

MUCHOW, R.C.; ROBERTSON, M.J.; PENGELLY, B.C. Radiation use efficiency of soybean, mungbean and cowpea under different environmental conditions. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.32, p.1-6, 1993.

NIELSEN, T.H.; STITT, M. Tobacco transformants with strongly decreased expression of pyrophosphate:fructose-6-phosphate expression in the base of their sink leaves contain much higher levels of fructose-2,6-bisphosphate but exhibit no major changes in fluxes. **Planta**, Frederiksberg C, v.214, p.106-116, 2001.

OKAZAKI, K.; SHINANO, T.; OSAKI, M. Difference in carbon distribution of initial photoassimilates between soybean and rice as revealed by 20 s Pulse-300 s chase experiments. **Soil Science Plant Nutrition**, Tokyo, v.51, n.6, p.835-840, 2005.

OLIVEIRA, D.C.R.; BUENO FILHO, J.S.S. **Análise Bayesiana de um Modelo Misto Normal Assimétrico para Dados de Microarrays**. [s.l.: s.n.], Disponível em: <<http://emr11.de.ufpe.br/cd/trabalhos/T107.pdf>>. Acesso em: 9 ago. 2010.

PEDERSEN, P.; LAUER, J.G. Response of soybean yield components to management system and planting date. **Agronomy Journal**, Madison, v. 96, p.1372-1381, 2004.

PENGELLY, B.C.; BLAMEY, F.P.C.; MUCHOW, R.C. Radiation interception and the accumulation of biomass and nitrogen by soybean and three tropical annual forage legumes. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 63, p. 99-112, 1999.

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: Centre for Agricultural Publishing and Documentation (Pudoc), 1989. 271 p.

PEREIRA, C.R. **Análise do crescimento e desenvolvimento da cultura de soja sob diferentes condições ambientais**. 2002. 282 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2002.

PROCÓPIO, S.O.; SANTOS, J.B.; SILVA, A.A. da; COSTA, L.C. Desenvolvimento folhar das culturas da soja e do feijão e de planta daninha. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.33, n.2, p.207-211, 2003.

PROULX, R.A.; NAEVE, S.L. Pod removal, shade and defoliation effects on soybean yield, protein and oil. **Agronomy Journal**, Madison, v.101, p.971-978, 2009.

ROBINSON, A.P.; CONLEY, S.P.; VOLENEC, J.J.; SANTINI, J.B. Analysis of high yielding, early-planted soybean in Indiana. **Agronomy Journal**, Madison, v.101, p.131-139, 2009.

ROCHETTE, P.; DESJARDINS, R.L.; PATTEY, E.; LESSARD, R. Instantaneous measurement of radiation and water use efficiencies of a maize crop. **Agronomy Journal**, Madison, v.88, p.627-635, 1996.

RODRIGUES, O.; DIDINET, A.D.; LHAMBY, J.C.B.; LUZ, J.S. da. Resposta quantitativa do florescimento da soja à temperatura e ao fotoperíodo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.36, n.3, p.431-437, 2001.

SANTOS, J.B.; PROCÓPIO, S.O.; SILVA, A.A.; COSTA, L.C. Captação e aproveitamento da radiação solar pelas culturas da soja e do feijão e por plantas daninhas. **Bragantia**, Campinas, v.62, n.1, p.147-153, 2003.

SCHÖFFEL, E.R.; VOLPE, C.A. Eficiência de conversão da radiação fotossinteticamente ativa interceptada pela soja para produção de fitomassa. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.9, n.2, p.241-249, 2001.

SEITER, S.; ALTERNOSE, C.E.; DAVIS, M.H. Forage soybean yield and quality responses to plant density and row distance. **Agronomy Journal**, Madison, v.96, p.966-970, 2004.

SETIYONO, T.D.; WEISS, A.; SPECHT, J.E.; BASTIDAS, A.M.; CASSMAN, K.G.; DOBERMANN, A. Understanding and modeling the effect of temperature and day-length on soybean phenology under high-yield conditions. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.100, p.257-271, 2007.

SETIYONO, T.D.; WEISS, A.; SPECHT, J.E.; CASSMAN, K.G.; DOBERMANN, A. Leaf area index simulation in soybean grown under near-optimal conditions. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.108, p.82-92, 2008.

SHIBLES, R.M.; ANDERSON, I.C.; GIBSON, A.H. Soybean. In: EVANS, L.T. (Ed). **Crop physiology, some case histories**. London: Cambridge University Press, 1975. p.151-189.

SHIBLES, R.M.; SECOR, J.; FORD, D.M. Carbon assimilation and metabolism. In: WILCOX, J.R. (Ed.). **Soybeans: improvement, production and uses**. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy; Crop Science Society of America, 1987. p. 535-588.

SHIBLES, R.M.; WERBER, C.R. Leaf area, solar radiation interception and dry matter production by soybeans. **Crop Science**, Madison, v.5, p.575-577, 1965.

SHIRAIWA, T.; UENO, N.; SHIMADA, S.; HORIE, T. Correlation between yielding ability and dry matter productivity during initial seed filing stage in various soybean genotypes. **Plant Production Science**, Tokyo, v.7, p.138-142, 2004.

SINCLAIR, T.R. Predicting carbon assimilation and crop radiation-use efficiency dependence on leaf nitrogen content. In: BOOTE, K.J.; LOOMIS, R.S. (Ed.). **Modeling crop photosynthesis-From biochemistry to canopy**. Madison: American Society of Agronomy; Crop Science Society of America, 1991. p.75-94. (CSSA. Special Publication, 19).

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.; SHIRAIWA, T.; HAMMER, G.L. Variation in crop radiation-use efficiency with increased diffuse radiation. **Crop Science**, Madison, v.32, p.1281-1284, 1992.

SINGER, J.W.; MALONE, R.W.; MEEK, D.W.; DRAKE, D. Predicting yield losses in indeterminate soybean from pod density using simulated damage studies. **Agronomy Journal**, Madison, v.96, p.584-589, 2004.

SOUZA, P.J.D.P.; RIBEIRO, A.; ROCHA, E.J.P.; FARIAS, J.R.B.; LOUREIRO, R.S.; BISPO, C.C.; SAMPAIO, L.. Solar radiation use efficiency by soybean under field conditions in the Amazon region. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.44, p.1211-1218, 2009.

SPAETH, S.C.; SINCLAIR, T.R.; OHNUMA, T.; KONNO, S. Temperature, radiation and duration dependence of high soybean yields: measurement and simulation. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.16, n.4, p.297-307, 1987.

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**, Dordrecht, v.123, p.193-203, 1990.

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

TANAKA, Y.; SHIRAIWA, T.; NAKAJIMA A.; SATO J.; NAKAZAKI T. Leaf Gas Exchange Activity in Soybean as Related to Leaf Traits and Stem Growth Habit. **Crop Science**, Madison, v.48, p.1925-1932, 2008.

THOMAS, J.F.; RAPER JÚNIOR, C.D. Photoperiodic control of seed filling for soybeans. **Crop Science**, Madison, v.16, p.667-672, 1976.

WANG, D.; SHANNON, M.C.; GRIEVE, C.M. Salinity reduces radiation absorption and use efficiency in soybean. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.69, p.267-277, 2001.

WILCOX, J.R.; CAVINS, J.F. Normal and low linolenic acid soybean strains: Response to planting date. **Crop Science**, Madison, v.32, p.1248-1251, 1992. Abstract.

WILCOX, J.R.; FRANKENBERGER, E.M. Indeterminate and determinate soybean responses to planting date. **Agronomy Journal**, Madison, v.79, p.1074-1078, 1987. Abstract.

YAKLICH, R.W.; VINYARD, B.; CAMP, M.; DOUGLASS, S.. Analysis of seed protein and oil from soybean Northern and Southern region uniform tests. **Crop Science**, Madison, v.42, p.1504-1515, 2002. Abstract.

YAMADA, T. "Blueprint" para maximizar a produção de soja. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, v.19, p.1-4, 1982.

ZEIHER, C.; EGLI, D.B.; LEGGETT, J.E.; REICOSKY, D.A. Cultivar differences in N redistribution in soybean. **Agronomy Journal**, Madison, v.74, p.375-379, 1982.

ANEXO I

Tabela 21 - Valores de temperatura média (mT, °C); desvio padrão (sT, °C); temperatura máxima média (T_M, °C); temperatura mínima média (T_m, °C); maior valor de temperatura máxima (MT_M, °C) e menor valor de temperatura mínima (mT_m, °C); referentes aos meses de janeiro a março no período de 1966 a 2009. Piracicaba, SP. ESALQ

dia	JAN						FEV						MAR					
	T	s	T _M	T _m	MT _m	mT _M	T	s	T _M	T _m	MT _m	mT _M	T	s	T _M	T _m	MT _m	mT _M
1	24,40	1,74	29,66	19,14	34,80	15,80	25,00	1,60	30,29	19,71	34,50	15,20	25,07	1,84	30,93	19,20	37,00	15,30
2	24,08	2,06	29,06	19,10	36,40	16,00	25,12	1,74	30,77	19,47	35,20	14,90	24,87	1,46	31,01	18,73	35,40	13,90
3	23,89	1,89	29,03	18,74	34,40	13,20	24,79	1,97	30,28	19,29	35,80	14,00	24,71	1,43	30,67	18,75	34,90	16,00
4	23,76	1,88	28,99	18,53	34,80	12,20	24,96	1,98	30,76	19,17	35,50	14,00	24,77	1,64	31,07	18,47	35,60	14,20
5	24,14	1,82	29,55	18,73	35,20	13,70	24,99	1,96	30,89	19,08	36,00	11,50	24,85	1,27	30,86	18,84	35,10	15,10
6	24,25	1,80	29,67	18,82	34,18	12,30	24,99	1,38	30,72	19,27	35,90	16,26	24,83	1,43	30,93	18,72	35,20	15,30
7	24,48	1,78	30,21	18,74	34,80	13,20	24,75	1,88	30,34	19,16	35,30	14,39	24,46	1,72	30,23	18,70	34,01	15,40
8	24,46	1,77	30,20	18,71	33,90	12,20	24,87	1,70	30,44	19,30	34,80	15,00	24,51	1,81	30,29	18,73	34,30	15,80
9	24,52	1,71	29,87	19,17	35,60	12,80	24,80	1,84	30,25	19,34	35,20	14,20	24,82	1,54	30,76	18,89	34,80	16,10
10	24,63	1,93	30,07	19,19	35,00	12,40	24,79	1,77	30,22	19,36	34,50	14,80	24,85	1,53	30,78	18,92	34,03	15,20
11	24,32	1,80	29,81	18,84	34,00	12,50	24,92	1,48	30,56	19,28	34,00	13,40	24,55	1,71	30,37	18,74	35,07	11,40
12	24,42	1,60	29,62	19,21	34,00	13,70	25,00	1,69	30,91	19,08	34,21	13,00	24,59	1,54	30,67	18,51	33,80	11,60
13	24,53	1,66	30,13	18,93	34,40	15,40	24,67	1,65	30,41	18,94	34,40	13,60	24,45	1,83	30,57	18,34	34,80	12,20
14	25,05	1,57	30,74	19,35	35,20	14,80	24,73	1,81	29,98	19,48	33,90	15,00	24,38	1,46	30,19	18,56	34,20	14,91
15	24,89	1,93	30,40	19,37	36,40	13,10	25,03	1,57	30,84	19,22	35,60	14,90	24,37	1,54	30,19	18,54	34,00	14,30
16	24,83	1,90	30,41	19,25	36,90	13,40	25,05	1,66	31,07	19,04	35,20	13,20	24,52	1,60	30,52	18,52	34,40	14,60
17	24,86	1,91	30,38	19,34	36,80	13,74	25,13	1,77	30,91	19,34	34,80	14,90	24,10	1,62	29,88	18,33	34,50	14,00
18	25,09	1,73	30,90	19,29	36,20	14,80	24,99	1,73	30,91	19,08	34,30	14,70	24,47	1,29	30,49	18,45	34,20	14,00
19	24,79	1,59	30,35	19,23	35,40	14,80	25,22	1,35	31,40	19,04	35,50	14,10	24,49	1,25	30,62	18,35	35,20	14,50
20	25,00	1,75	30,60	19,39	36,15	15,60	24,80	1,82	30,55	19,05	34,20	15,10	24,16	1,36	30,00	18,28	34,20	14,20
21	24,77	1,95	30,31	19,23	35,74	14,00	25,00	1,35	31,18	18,83	34,20	15,20	24,10	1,66	29,89	18,31	34,80	12,50
22	24,59	2,03	30,02	19,17	35,10	14,90	24,85	1,68	30,63	19,07	35,60	13,80	23,83	1,59	29,49	18,16	33,90	12,10
23	24,55	1,62	30,38	18,72	34,40	14,40	24,94	1,69	30,65	19,24	36,40	15,40	23,93	1,53	30,13	17,74	34,10	13,51
24	25,00	1,50	30,97	19,03	35,80	14,90	24,94	1,78	30,86	19,02	35,90	13,70	24,15	1,48	30,40	17,91	34,20	12,70
25	25,14	1,52	30,81	19,48	35,87	16,10	24,97	1,55	30,97	18,98	35,20	13,30	24,18	1,45	30,12	18,25	34,60	14,02
26	24,62	2,08	29,74	19,49	35,60	16,90	24,85	1,49	30,86	18,84	35,50	13,40	23,74	2,01	29,89	17,59	33,80	11,80
27	24,51	1,95	29,58	19,45	36,70	17,00	24,91	1,54	30,89	18,94	36,00	14,40	23,55	2,09	29,60	17,49	33,90	11,80
28	24,70	1,69	30,08	19,32	35,00	15,63	25,13	1,67	31,08	19,17	36,40	15,60	23,60	2,11	29,58	17,61	34,17	10,60
29	24,83	1,93	30,21	19,45	34,70	13,86	-	-	-	-	-	-	23,85	2,16	29,95	17,74	34,68	10,00
30	25,02	1,95	30,59	19,44	35,10	13,80	-	-	-	-	-	-	23,98	1,85	29,90	17,90	33,40	11,70
31	25,05	1,53	30,56	19,55	35,30	14,20	-	-	-	-	-	-	23,88	1,64	29,91	17,86	34,30	13,00

Fonte: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ/USP)

Tabela 22 - Valores de temperatura média (mT, °C); desvio padrão (sT, °C); temperatura máxima média (T_M, °C); temperatura mínima média (T_m, °C); maior valor de temperatura máxima (MT_M, °C) e menor valor de temperatura mínima (mT_m, °C); referentes aos meses de abril a junho no período de 1966 a 2009. Piracicaba, SP. ESALQ

dia	ABR						MAIO						JUN					
	T	s	T _M	T _m	MT _m	mT _M	T	s	T _M	T _m	MT _m	mT _M	T	s	T _M	T _m	MT _m	mT _M
1	23,88	1,71	29,99	17,76	34,20	10,80	20,62	2,37	27,45	13,79	32,00	6,40	17,47	3,10	24,46	10,48	29,60	(0,50)
2	23,47	1,72	29,52	17,36	33,42	12,70	20,82	2,34	27,59	14,05	32,80	8,20	17,64	3,14	24,74	10,54	29,60	(0,80)
3	23,51	1,81	29,63	17,39	33,80	12,90	20,57	2,69	27,23	13,91	31,60	6,80	17,67	2,84	24,55	10,78	29,10	2,80
4	23,13	1,93	28,90	17,35	33,50	13,30	20,56	2,64	27,44	13,69	30,90	5,00	17,60	2,53	24,39	10,80	29,94	2,68
5	22,98	2,02	29,13	16,83	33,40	12,60	19,84	2,70	26,64	13,04	30,85	3,80	17,58	2,83	24,53	10,63	29,16	2,00
6	22,97	2,06	29,36	16,58	33,80	11,60	19,78	2,43	26,26	13,30	31,20	3,80	18,14	2,78	25,38	10,90	30,00	0,60
7	22,73	2,34	28,87	16,59	33,80	8,20	19,90	2,17	26,80	13,00	31,20	6,10	17,90	2,61	24,91	10,88	30,60	4,20
8	22,53	2,34	28,86	16,19	33,20	9,70	20,00	2,30	26,94	13,07	31,20	6,87	17,95	3,06	25,25	10,65	30,09	2,40
9	22,56	2,24	28,91	16,21	32,60	9,80	19,65	2,22	26,45	12,84	32,20	6,10	17,98	3,10	25,51	10,45	29,60	2,00
10	22,62	2,14	29,31	15,93	33,20	10,20	19,68	2,15	26,54	12,83	32,80	6,20	18,29	3,19	25,33	11,25	30,10	3,20
11	22,56	2,00	29,15	15,97	32,80	10,00	19,71	2,16	26,73	12,69	30,90	7,20	18,01	2,66	24,94	11,08	29,00	4,90
12	22,76	1,94	29,19	16,34	33,40	10,20	20,04	1,81	27,06	13,01	30,85	8,20	18,14	2,02	25,45	10,84	30,01	4,40
13	22,46	2,26	28,75	16,17	33,80	10,40	19,92	2,11	26,90	12,94	30,54	6,00	18,35	2,28	25,92	10,77	30,20	5,00
14	22,49	2,25	28,88	16,11	33,20	8,20	20,01	1,93	26,47	13,54	30,31	7,40	18,41	2,20	25,84	10,99	30,34	4,40
15	22,71	2,06	29,25	16,18	33,00	9,40	19,78	2,02	26,23	13,32	30,40	7,60	18,12	2,34	25,23	11,02	29,60	5,60
16	22,33	2,03	28,58	16,09	32,70	9,40	19,24	2,45	25,83	12,65	31,40	6,00	17,86	2,69	25,00	10,71	31,30	5,60
17	22,06	2,25	28,46	15,66	33,10	9,56	19,18	3,09	26,06	12,31	31,74	3,40	17,76	2,49	25,44	10,09	30,50	4,70
18	21,94	2,23	28,37	15,51	32,80	5,76	19,25	2,73	26,16	12,34	31,02	1,60	17,88	2,27	25,53	10,23	31,30	5,00
19	22,03	2,40	28,56	15,50	32,60	6,72	19,16	2,64	26,10	12,21	31,82	3,00	17,97	2,29	25,70	10,24	29,80	2,40
20	21,56	1,89	27,72	15,40	32,10	7,17	19,02	2,56	25,86	12,18	31,88	5,00	17,83	2,66	25,31	10,35	30,50	2,00
21	21,74	1,88	28,14	15,35	32,40	10,80	19,35	2,61	26,14	12,57	31,40	5,00	17,80	2,30	25,13	10,46	29,30	2,60
22	21,83	1,92	28,38	15,28	32,10	9,80	18,72	2,39	24,93	12,52	30,90	5,90	17,76	2,13	25,16	10,35	29,90	4,12
23	21,96	2,09	28,82	15,10	32,30	9,80	18,70	2,21	25,05	12,34	30,60	3,80	17,97	1,94	25,47	10,47	29,90	2,40
24	21,69	1,94	28,60	14,79	32,20	10,40	18,25	2,26	24,69	11,81	30,40	4,10	18,08	1,94	25,47	10,69	29,23	2,60
25	21,42	1,97	27,85	14,99	31,93	9,30	18,20	2,36	25,14	11,19	30,40	4,70	18,13	2,17	24,83	11,43	30,40	3,00
26	21,20	2,09	28,03	14,37	32,14	7,20	18,19	2,40	25,42	10,97	30,00	5,40	17,78	2,38	24,78	10,78	30,30	0,30
27	21,21	2,04	28,11	14,32	32,20	7,40	18,16	2,17	25,28	11,04	30,00	6,00	17,84	2,70	25,41	10,26	30,40	(0,40)
28	21,19	2,06	27,93	14,45	31,82	10,10	18,33	2,39	25,59	11,08	30,40	5,00	17,81	2,52	25,35	10,26	30,00	1,20
29	21,12	1,99	27,61	14,64	31,68	10,10	18,31	1,98	25,19	11,42	30,00	5,03	17,87	2,45	25,30	10,44	29,51	3,30
30	20,53	2,21	27,15	13,90	31,40	6,60	18,41	2,51	25,27	11,56	32,03	3,33	17,82	1,98	25,19	10,46	29,80	4,40
31	-	-	-	-	-	-	17,90	2,94	24,77	11,03	29,53	(0,20)	-	-	-	-	-	-

Fonte: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ/USP)

Tabela 23 - Valores de temperatura média (mT, °C); desvio padrão (sT, °C); temperatura máxima média (T_M, °C); temperatura mínima média (T_m, °C); maior valor de temperatura máxima (MT_M, °C) e menor valor de temperatura mínima (mT_m, °C); referentes aos meses de julho a setembro no período de 1966 a 2009. Piracicaba, SP. ESALQ

dia	JUL						AGO						SET					
	T	s	T _M	T _m	MT _m	mT _M	T	s	T _M	T _m	MT _m	mT _M	T	s	T _M	T _m	MT _m	mT _M
1	18,20	2,08	26,09	10,32	30,20	4,50	18,23	2,74	26,42	10,04	31,00	4,00	20,88	2,57	28,34	13,42	35,10	7,80
2	18,41	2,11	25,92	10,90	30,18	5,30	18,33	2,06	26,40	10,26	32,80	4,50	20,11	2,91	27,35	12,88	34,50	7,00
3	18,57	2,18	25,96	11,19	30,90	3,90	18,43	2,36	26,47	10,39	31,60	5,60	19,85	2,89	27,06	12,65	34,50	3,57
4	18,23	2,22	25,74	10,72	31,20	4,20	18,60	2,25	26,79	10,41	32,20	5,70	19,98	2,66	27,03	12,93	34,00	7,05
5	18,27	2,08	25,91	10,62	30,20	2,80	18,92	2,67	26,56	11,29	33,50	5,40	19,99	2,75	27,25	12,73	34,20	6,83
6	18,32	2,49	25,79	10,85	31,90	3,40	19,25	2,69	26,79	11,71	32,90	4,90	20,11	2,70	27,47	12,76	35,60	4,69
7	18,19	2,83	25,39	10,98	31,40	0,80	19,42	2,83	27,80	11,04	33,40	2,60	20,36	2,40	27,55	13,17	35,67	8,00
8	18,10	2,73	25,35	10,85	30,30	2,80	19,52	2,65	27,53	11,50	33,00	2,20	20,67	2,56	27,78	13,56	34,70	9,10
9	17,65	2,98	24,99	10,32	30,50	4,20	19,57	2,69	27,57	11,57	32,20	2,60	20,33	2,65	27,22	13,43	36,03	8,80
10	16,75	3,03	23,57	9,93	29,70	0,60	19,01	2,71	26,24	11,79	32,16	4,40	20,87	2,95	28,29	13,45	36,60	5,20
11	16,89	2,62	23,86	9,93	30,20	0,00	18,67	2,59	26,49	10,85	32,60	5,68	20,87	3,07	28,37	13,37	35,50	7,90
12	16,73	2,59	24,02	9,44	30,80	3,80	18,96	3,08	27,06	10,86	33,40	4,60	20,97	2,88	28,35	13,58	35,70	8,04
13	16,95	2,69	24,77	9,13	31,40	2,80	19,45	2,93	27,49	11,03	33,90	4,70	21,54	2,61	28,76	14,32	36,20	8,70
14	17,33	2,36	25,34	9,33	31,00	4,00	19,65	2,92	27,70	11,59	33,60	5,80	21,52	2,70	28,52	14,52	35,70	8,60
15	17,82	2,43	25,85	9,80	30,60	3,20	18,94	3,54	26,68	11,20	33,40	1,40	20,90	3,00	27,53	14,27	36,38	8,20
16	17,84	2,97	25,71	9,97	32,00	3,20	18,91	3,46	26,81	11,01	34,14	0,60	20,24	2,93	26,74	13,75	33,00	4,80
17	17,51	2,79	25,37	9,66	30,80	2,44	19,24	2,71	27,11	11,36	33,00	5,20	20,27	2,78	27,46	13,07	34,44	7,40
18	17,58	3,50	25,59	9,58	31,20	(1,00)	19,42	2,24	27,27	11,56	32,00	3,30	20,84	3,21	27,98	13,70	36,50	6,40
19	17,18	2,79	24,56	9,80	31,00	1,20	19,42	2,44	27,15	11,69	33,50	3,70	21,40	2,41	28,58	14,22	35,00	8,00
20	17,41	3,04	25,29	9,54	31,06	2,50	19,33	2,25	27,13	11,52	31,90	6,00	21,31	3,31	28,02	14,60	36,00	6,50
21	17,39	3,29	25,05	9,73	32,00	(1,80)	19,04	2,65	26,74	11,34	33,30	5,80	20,65	3,02	27,01	14,30	35,60	8,30
22	17,96	3,38	25,20	10,72	31,60	1,40	19,30	2,77	27,10	11,50	33,50	5,00	20,63	3,26	27,48	13,77	36,40	6,00
23	17,64	2,51	24,52	10,75	31,16	4,40	19,56	2,74	27,16	11,95	34,50	5,50	21,29	3,39	28,62	13,96	37,40	4,60
24	17,30	2,35	24,68	9,91	31,27	5,10	20,43	2,22	28,21	12,66	33,20	7,20	21,56	3,28	28,70	14,42	36,92	5,60
25	17,69	2,30	25,46	9,92	31,10	4,80	20,20	2,57	28,18	12,21	33,40	6,90	20,86	3,13	27,52	14,19	38,20	7,80
26	17,85	2,65	25,77	9,92	30,84	2,90	20,21	2,73	28,56	11,86	33,52	4,90	20,71	3,10	27,50	13,92	37,80	7,90
27	18,12	2,45	26,29	9,95	31,79	4,80	20,10	2,89	27,99	12,21	33,80	2,90	21,38	2,87	28,11	14,66	37,40	9,70
28	18,30	3,00	26,31	10,28	32,43	4,60	20,30	2,85	28,40	12,20	34,20	4,80	21,50	2,70	28,56	14,43	36,52	10,80
29	18,53	2,77	26,92	10,14	31,20	1,80	20,14	2,75	28,38	11,90	35,20	5,00	21,50	2,51	28,24	14,76	36,00	9,90
30	18,39	2,59	26,39	10,39	31,00	2,20	20,51	2,65	28,41	12,60	34,50	6,70	21,34	2,22	27,50	15,17	33,80	10,50
31	18,19	2,84	25,93	10,45	31,20	3,60	20,80	2,68	28,90	12,69	34,50	5,40	-	-	-	-	-	-

Fonte: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ/USP)

Tabela 24 - Valores de temperatura média (mT, °C); desvio padrão (sT, °C); temperatura máxima média (T_M, °C); temperatura mínima média (T_m, °C); maior valor de temperatura máxima (MT_M, °C) e menor valor de temperatura mínima (mT_m, °C); referentes aos meses de outubro a dezembro no período de 1966 a 2009. Piracicaba, SP. ESALQ

dia	OUT						NOV						DEZ					
	T	s	T _M	T _m	MT _m	mT _M	T	s	T _M	T _m	MT _m	mT _M	T	s	T _M	T _m	MT _m	mT _M
1	21,70	2,30	28,43	14,97	35,63	10,00	23,76	2,60	30,16	17,36	36,40	11,00	23,80	1,96	29,55	18,05	35,10	13,88
2	22,00	2,18	28,76	15,24	37,60	10,20	23,61	2,63	30,09	17,13	36,80	8,60	24,22	1,95	30,39	18,05	35,10	13,30
3	22,09	2,25	28,69	15,49	34,60	10,60	23,59	2,52	29,65	17,54	36,50	11,00	23,87	2,25	29,80	17,94	35,77	13,10
4	22,44	2,59	29,57	15,31	34,63	11,00	23,24	2,79	29,44	17,03	37,00	11,84	23,79	2,07	29,58	17,99	34,40	12,90
5	22,82	2,02	29,95	15,69	35,61	9,80	23,26	2,73	29,46	17,05	36,20	11,80	23,90	2,07	29,67	18,12	35,00	13,00
6	22,80	2,44	29,48	16,12	35,60	9,90	23,28	2,57	29,56	17,01	35,80	11,90	24,57	1,46	30,64	18,51	34,00	14,30
7	22,23	2,76	28,81	15,65	35,80	9,40	23,25	2,23	29,38	17,13	34,30	12,56	24,53	1,48	30,29	18,78	33,90	13,80
8	21,88	2,62	28,51	15,25	34,80	9,91	24,22	1,98	30,93	17,52	35,50	13,60	24,34	1,59	30,38	18,30	35,00	14,60
9	22,33	2,53	29,22	15,45	35,20	8,40	24,34	1,91	31,04	17,65	35,70	13,42	23,93	2,22	29,65	18,20	35,00	14,20
10	22,26	2,62	29,31	15,21	36,30	6,40	23,92	2,78	30,07	17,77	36,38	13,80	24,01	2,26	29,67	18,34	34,80	14,60
11	22,34	2,99	28,92	15,76	36,84	11,40	23,26	2,96	29,04	17,47	36,64	11,04	24,26	1,92	29,72	18,80	36,50	15,00
12	22,61	2,79	29,44	15,78	36,84	9,00	23,21	2,77	28,92	17,51	35,88	11,66	24,21	1,90	29,54	18,87	35,20	13,40
13	23,05	2,54	30,05	16,05	37,70	9,80	23,01	2,52	28,77	17,26	36,20	11,20	24,23	2,03	29,61	18,85	35,20	13,30
14	22,85	2,62	30,03	15,66	36,52	8,50	23,08	2,26	29,14	17,03	37,10	11,60	24,32	1,91	29,81	18,83	35,90	13,40
15	23,13	2,80	29,97	16,28	36,84	10,00	23,41	2,34	29,72	17,10	36,80	11,40	24,22	1,96	29,80	18,65	34,62	13,70
16	23,56	2,50	30,60	16,53	36,96	10,80	23,86	2,34	30,13	17,60	37,80	12,20	24,46	1,84	30,37	18,56	34,53	12,20
17	23,07	2,62	29,07	17,08	36,40	10,65	23,93	2,32	30,15	17,72	38,40	12,57	23,93	2,15	29,21	18,66	33,80	11,70
18	22,96	2,65	29,17	16,76	36,00	10,80	23,99	2,07	30,02	17,95	40,20	12,39	23,94	1,61	29,33	18,55	34,00	14,40
19	22,41	2,72	28,16	16,66	35,60	10,60	23,64	2,13	29,62	17,67	36,20	12,88	24,13	1,71	29,77	18,49	34,00	13,80
20	21,78	3,23	27,71	15,85	36,20	7,80	23,60	2,00	29,99	17,20	35,30	12,20	24,56	1,56	30,40	18,72	34,50	13,00
21	22,59	2,89	29,10	16,07	37,76	9,00	23,30	2,13	29,59	17,02	35,70	13,62	24,44	1,71	30,20	18,69	35,00	13,00
22	22,51	2,15	29,02	16,00	35,01	11,00	23,83	2,16	30,33	17,32	36,30	10,60	24,39	1,80	29,96	18,82	34,10	14,60
23	22,49	2,00	29,00	15,97	36,56	9,40	23,94	2,10	30,47	17,40	36,40	10,10	24,26	1,99	29,77	18,76	34,61	13,80
24	22,64	2,40	29,31	15,96	35,00	9,80	23,96	1,86	30,54	17,38	34,80	9,60	23,89	2,32	29,20	18,57	35,05	14,30
25	23,18	2,69	29,71	16,66	35,45	9,40	24,00	2,05	30,28	17,72	36,20	10,10	23,75	2,02	29,10	18,41	33,80	13,60
26	23,98	2,63	30,39	17,57	35,20	11,10	23,68	2,13	29,67	17,68	35,80	10,60	23,81	1,54	29,27	18,35	33,90	13,40
27	23,88	2,46	29,82	17,94	35,50	13,44	23,68	2,28	29,72	17,65	34,40	10,00	24,01	1,84	29,57	18,45	33,90	14,60
28	23,70	2,14	30,14	17,27	34,63	13,50	23,34	1,96	29,23	17,46	34,20	10,60	24,00	1,86	29,67	18,33	33,98	13,00
29	23,85	2,31	30,62	17,09	36,88	11,58	23,41	1,69	29,72	17,10	35,90	12,50	24,04	1,81	29,79	18,29	35,56	14,00
30	23,52	2,32	30,00	17,05	36,00	12,00	23,60	1,35	29,38	17,83	35,60	12,40	24,39	1,74	29,99	18,79	34,78	10,70
31	23,80	2,90	30,35	17,24	36,80	10,50	-	-	-	-	-	-	24,60	1,62	30,34	18,87	35,25	12,90

Fonte: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ/USP)

Tabela 25 - Valores médios de radiação global (Q_g , MJ.m⁻².dia⁻¹) referentes aos meses de outubro a dezembro no período de 1978 a 2009. Piracicaba, SP. ESALQ

dia	JAN	FEV	MAR	ABR	MAIO	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
1	19,02	19,20	18,84	17,46	15,50	12,51	12,87	14,69	15,81	16,87	20,43	20,42
2	16,94	19,24	18,27	17,39	13,57	12,25	11,65	13,65	15,46	16,91	19,43	20,24
3	17,34	18,81	18,32	17,06	14,83	11,71	12,35	13,04	16,13	18,32	18,82	20,93
4	17,41	19,61	19,67	16,74	14,47	11,91	12,71	15,25	16,41	19,44	18,12	19,91
5	18,17	19,61	18,37	16,95	14,71	12,05	12,57	14,16	14,55	17,67	18,40	19,93
6	18,93	19,34	17,66	16,31	14,17	11,86	12,10	14,85	15,73	16,51	19,80	19,08
7	20,44	19,04	16,93	14,85	13,96	12,66	12,27	15,42	16,44	17,20	20,15	18,81
8	18,79	18,33	17,69	16,40	13,58	11,93	12,65	14,14	15,07	16,88	21,86	19,23
9	18,07	17,93	17,92	17,62	13,71	12,37	12,82	13,86	16,87	18,78	20,45	18,83
10	20,15	18,34	17,95	17,93	13,51	12,13	11,23	13,67	16,76	18,15	18,61	19,02
11	19,37	18,91	17,84	17,43	13,01	11,96	12,59	15,28	16,81	18,31	17,80	17,17
12	18,16	19,13	17,83	17,08	13,91	12,30	12,49	15,83	16,63	18,26	18,88	17,40
13	19,36	18,78	18,54	15,55	12,60	13,21	13,09	15,45	15,35	18,20	18,73	17,98
14	20,78	18,50	17,47	15,95	12,79	12,31	13,46	15,64	14,85	19,12	19,42	17,78
15	19,35	19,54	16,65	15,02	12,70	12,60	13,13	15,74	14,15	18,62	19,75	19,64
16	19,77	19,72	17,64	15,24	12,34	11,84	13,01	15,86	15,91	18,45	20,36	19,81
17	19,88	19,11	16,68	15,87	13,03	12,42	12,55	15,71	17,15	17,68	21,48	19,40
18	20,09	19,14	18,34	15,77	12,99	12,23	11,93	15,80	17,14	17,88	20,13	19,52
19	19,96	20,48	16,42	15,79	12,22	12,40	11,30	14,61	16,50	15,94	19,41	20,55
20	18,86	18,63	17,00	14,73	12,16	11,26	13,21	15,77	16,56	18,54	21,36	21,17
21	18,67	19,48	16,50	15,33	12,46	11,97	12,72	16,12	15,57	19,95	21,33	20,71
22	19,15	18,79	16,46	15,91	11,17	11,89	12,62	15,90	16,96	20,56	21,30	20,06
23	19,27	19,39	18,06	16,87	11,66	12,19	12,12	14,18	17,32	20,95	21,34	20,08
24	20,08	18,71	17,36	14,79	11,36	11,71	12,77	15,70	17,02	20,01	20,64	18,39
25	17,68	18,35	17,79	14,92	12,18	10,28	13,27	16,18	16,39	18,62	19,79	19,09
26	16,98	18,95	17,16	14,80	12,90	11,97	14,23	16,73	17,18	17,99	19,13	19,64
27	16,31	18,22	16,00	15,71	12,36	12,66	13,87	16,06	17,12	18,60	20,85	19,15
28	18,43	18,96	17,14	15,46	12,20	11,41	13,84	15,88	17,67	20,05	21,54	20,13
29	18,49	-	16,79	14,77	11,69	12,02	14,29	15,68	16,33	20,67	22,76	19,40
30	19,96	-	16,84	14,51	11,41	12,59	13,53	16,66	17,00	19,39	21,03	20,05
31	19,43	-	17,29	-	11,67	-	14,00	15,58	-	19,42	-	20,42

Fonte: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ/USP)

ANEXO II

Distribuição de probabilidade triangular assimétrica

Utiliza-se a distribuição triangular assimétrica quando há possibilidade de determinação do valor mais provável da variável aleatória, os seus valores mínimo e máximo, e quando uma função linear parece apropriada para a descrição da distribuição dos valores dos erros das variáveis. Atendendo estes quesitos, a distribuição triangular pode ser usada, pois é um bom modelo entre a distribuição normal e a distribuição retangular. A área sob a curva da distribuição normal mais ou menos um desvio padrão da média corresponde a 0,6827. As áreas sob a curva das distribuições triangular e retangular são 0,64983 e 0,57735, respectivamente (BRESSAN, 2002). Também segundo Bressan (2002), essa distribuição de probabilidade é usada em duas situações: (i) quando o objetivo é obter uma aproximação na ausência de dados, a qual permite ajustar uma distribuição mais adequada, ou (ii) quando se conhece apenas os valores mais provável (m), mínimo (a) e máximo (b) da variável, mas não se conhece muito sobre a distribuição empírica dos dados.

Quando os valores da grandeza na variável em estudo apresentam uma tendência central, encontrando-se com maior probabilidade com valores próximos do valor médio, recorre-se à distribuição normal, ou à distribuição triangular, esta última com uma função densidade de probabilidades da variável aleatória triangular (BRESSAN, 2002).

$$f(x) = \begin{cases} \frac{2(X-a)}{(m-a)(b-a)} & \text{Se } a \leq X \leq m \\ \frac{2(b-X)}{(b-m)(b-a)} & \text{Se } m < X \leq b \\ 0 & \text{Se } X < a \text{ ou } X > b \end{cases} \quad (22)$$

O gráfico da função densidade de probabilidade da variável aleatória triangular é mostrado a seguir (Figura 35).

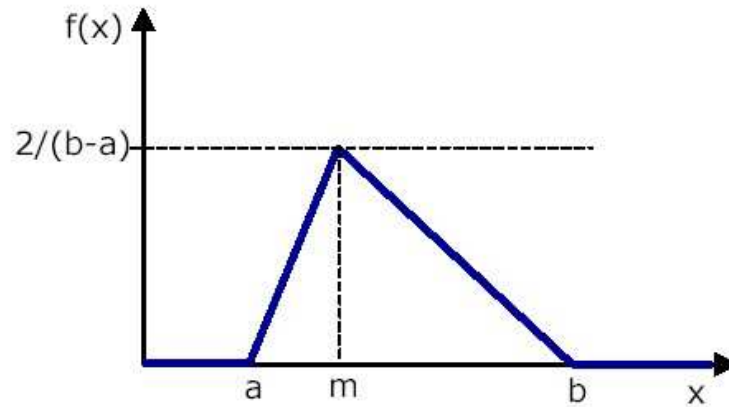


Figura 35 - Função da distribuição densidade de probabilidade triangular da variável aleatória contínua triangular. Fonte: ASSIS, 2004, p. 51

A Função de distribuição $[F(x)]$, da variável aleatória triangular é dada por:

$$F(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } X < a \\ \frac{(X-a)^2}{(m-a)(b-a)} & \text{se } a \leq X \leq m \\ 1 - \frac{(b-X)^2}{(b-m)(b-a)} & \text{se } m < X \leq b \\ 1 & \text{se } b \leq X \end{cases} \quad (23)$$

A média e a variância são determinadas conforme as equações a seguir.

$$E(X) = \frac{(a+m+b)}{3} \quad (24)$$

$$Var(X) = \frac{(a^2 + m^2 + b^2 - ma - ab - mb)}{18} \quad (25)$$

Distribuição de probabilidade normal truncada simétrica

É usada para “ajustar modelos lineares mistos em que as distribuições dos efeitos aleatórios sejam normais assimétricas multivariadas e que possam ter distribuição normal, caso o parâmetro de assimetria seja igual a zero” (OLIVEIRA; BUENO FILHO, 2010).

A distribuição de probabilidade normal truncada simétrica (a , b , μ , σ^2) é dada pela seguinte expressão (KORTUM, 2002 apud ASSIS, 2004):

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right\} \\ \frac{\{P(x < a) + P(x > b)\}}{\{P(x < a) + P(x > b)\}}, & a < x < b, \quad \mu \in R, \quad \sigma^2 > 0 \\ 0, & x \geq b \end{cases} \quad (26)$$

em que f se refere à função densidade da normal padrão; F à respectiva distribuição acumulada; e σ^2 à variância da normal não truncada correspondente.

A média (μ_{TS}) e a variância (σ_{TS}^2) da distribuição de probabilidade normal truncada simétrica são assim calculadas:

$$\mu_{NTS} = \frac{(a+b)}{2} \quad (27)$$

$$\sigma_{NTS}^2 = \sigma^2 \left\{ 1 - \left[\frac{b \cdot f(b) - a \cdot f(a)}{F(b) - F(a)} \right] - \left[\frac{f(b) - f(a)}{F(b) - F(a)} \right] \right\} \quad (28)$$