

**UNIVERSIDADE REGIONAL DO NOROESTE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO  
SUL-UNIJIÚ**

NEILA DE TOLEDO E TOLEDO

**MODELAGEM MATEMÁTICA DO DESENVOLVIMENTO DO ACÚMULO E  
PARTIÇÃO DA MASSA SECA EM SOJA**

Ijuí-RS

2007

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

NEILA DE TOLEDO E TOLEDO

**MODELAGEM MATEMÁTICA DO DESENVOLVIMENTO DO ACÚMULO E  
PARTIÇÃO DA MASSA SECA EM SOJA**

Dissertação apresentada ao Departamento de Física, Estatística e Matemática, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, para a obtenção do título de Mestre em Modelagem Matemática.

Orientador: Prof. Dr. Artur Gustavo Muller (DEAg)  
Co-orientador: Prof. Dr. Jorge Luiz Berto (DEAg)

Ijuí,RS  
2007

## **DEDICATÓRIA**

Aos meus pais, que mesmo distantes, lutaram comigo, compartilhando, incentivando-me a prosseguir na jornada, independente de quais fossem os obstáculos, não basta uma palavra de agradecimento, mas dedico essa conquista com a mais profunda admiração, amor e a certeza de que valeu a pena.

## AGRADECIMENTOS

**A Deus**, por ser luz em meu caminho, encorajando-me a nunca desistir de meus ideais.  
**A minha família**, pelo apoio e amor incondicional demonstrado em todos os momentos de minha vida.

**Ao Prof. Dr. Artur Gustavo Muller**, pela amizade, paciência e por ter compartilhado com seu vasto conhecimento durante a orientação deste trabalho de pesquisa.

**Ao Prof. Dr. Jorge Luiz Berto**, pela co-orientação na realização desta pesquisa e aos conhecimentos transmitidos.

**Aos professores do Mestrado em Modelagem Matemática**, pelos ensinamentos, amizade e compreensão.

**Aos colegas de curso**, pela amizade, disponibilidade, às idéias trocadas e aos momentos compartilhados. Á vocês digo “Não é uma despedida. Hoje partimos e ficamos na lembrança de cada um”, desejo sucesso a todos.

**Aos acadêmicos do curso de Agronomia**, Cleriston Fidelis Marchesan, Tiago Margutti, Bruno Lauratti, Juliano Fiorin , pela colaboração durante os trabalhos de campo, bem como à todos os funcionários e coordenação do Instituto Regional de Desenvolvimento Rural (IRDeR), pela atenção e ajuda nos momentos solicitados.

**Aos funcionários do DEAg**, Márcia, Cláudia e Gilvan pela atenção com que sempre me receberam no departamento.

**Aos funcionários do DeFEM**, em especial a **Geni**, pelas palavras amigas nos momentos difíceis e pelos auxílios em minhas solicitações.

**À todos**, que de uma forma ou de outra colaboraram com este trabalho de pesquisa.

## RESUMO

A produção de soja apresenta-se como a principal atividade econômica na região Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, para tanto utilizar práticas adequadas de manejo da cultura se faz necessário para atingir uma produtividade satisfatória. Dentre as práticas de manejo a época de plantio apresenta variações no potencial ambiental de produtividade e no nível de risco de ocorrência de adversidade. O presente trabalho tem como objetivo principal realizar a calibração do modelo energético de simulação da produção potencial da soja baseado em relações ecofisiológicas da cultura a partir de experimentos com diferentes condições ambientais e de referências bibliográficas existentes. Isto permitirá a verificação da adequação deste modelo matemático na região Noroeste do nosso Estado, mostrando que a adaptação do modelo de estimativa da produtividade para um determinado local ou um experimento depende principalmente do ajuste adequado das variáveis genéticas que atuam na velocidade de desenvolvimento da cultura. Foram realizados experimentos nos anos agrícolas de 2004/05 e 2005/06 no IRDeR (Instituto Regional de Desenvolvimento Rural) localizado em Augusto Pestana-RS (28° 27' 17" de latitude e 53°54'50" de longitude) com a cultivar de soja IAS 5. Nestes experimentos foram identificadas as datas nas quais ocorreram as principais fases do desenvolvimento da cultura da soja, seguindo a Escala Fenológica de Feher & Caviness. O acúmulo de matéria seca total pela parte área da cultura, a partição da matéria seca e o índice de área foliar (IAF) foram estimados em quatro momentos: no final do período de instalação da população vegetal (período de crescimento vegetativo V6); no início do florescimento (R1); início do enchimento de grãos (R5); no início da maturação (R7). Os componentes do rendimento (nº nós/ m<sup>2</sup>; nº vagens/ m<sup>2</sup>; nº grãos/m<sup>2</sup>; peso de 100 grão; rendimento por área foram medidos na colheita. Durante o período experimental as variáveis meteorológicas de radiação solar global e temperatura mínimas e máximas diárias foram coletadas através da estação agrometeorológica da FEPAGRO que encontra-se no local dos experimentos. Estas variáveis juntamente com o fotoperíodo foram utilizadas como parâmetros de entrada do modelo matemático. Após o ajuste dos coeficientes genéticos (fotoperíodo crítico, acúmulo de dias fototermais), determinação dos coeficientes de interceptação ( eficiência de uso da radiação fotossinteticamente ativa, coeficiente de extinção da cultura) determinados a partir dos dados experimentais e bibliográficos, desenvolveu-se no programa Stella 5.0 um modelo matemático de desenvolvimento da soja, como também um modelo de acúmulo e partição da massa seca acumulada pela parte área da cultura. Após realizou-se as simulações da produção potencial da soja para os dois anos agrícolas em estudo, com as datas de plantio experimentais e com datas antecipadas com relação às realizadas nos experimentos, como também foram realizadas simulações com outros anos agrícolas (1981/82, 1982/83, 1983/84 e 1984/85) usando as datas de semeadura dos experimentos de 2004/05 e 2005/06. Através da análise das simulações observou-se que o modelo matemático pode ser utilizado para as condições climatológicas da região Noroeste do Estado, apresentando uma estimativa de dados condizente com os dados obtidos a campo.

## ABSTRACT

The soy production comes as to main economical activity in the Northwest area of the State of Rio Grande do Sul, for so much to use appropriate practices of handling of the culture is made necessary to reach a satisfactory productivity. Among the handling practices the planting time presents variations in the environmental potential of productivity and in the level of risk of adversity occurrence. The present work has as main objective to accomplish the calibration of the energy model of simulation of the potential production of the soy based on relationships ecofisiológicas of the culture starting from experiments with different environmental conditions and of existent bibliographical references. This will allow the verification of the adaptation of this mathematical model in the Northwest area of our State, showing that the adaptation of the model of estimate of the productivity to a certain place or an experiment depends mainly on the appropriate adjustment of the genetic variables that you/they act in the speed of development of the culture. Experiments were accomplished in the agricultural years of 2004/05 and 2005/06 in IRDeR (Regional Institute of Rural Development) located in Augusto Lash-RS (28th 27'17 " of latitude and 53°54'50"de longitude) with to cultivate of soy you IAS 5. In these experiments they were identified the dates in which happened the main phases of the development of the culture of the soy, following the Scale Fenológica of Feher & Caviness. The accumulation of matter total drought for the part area of the culture, the partition of the matter evaporates and the area index to foliate they were dear in four moments: in the end of the period of installation of the vegetable population (period of vegetative growth V6); in the beginning of the florescimento (R1); beginning of the stuffing of grains (R5); in the beginning of the maturation (R7). The components of the revenue (n° us/ m<sup>2</sup>; n° beans/ m<sup>2</sup>; n° grains /m<sup>2</sup>; I weigh of 100 grain; revenue for area was measured in the crop. During the experimental period the meteorological variables of global solar radiation and temperature low and daily maxims were collected through the station agrometeorológica of FEPAGRO that is at the place of the experiments. These varied together with the fotoperíodo they were used as parameters of entrance of the mathematical model. After the adjustment of the genetic coefficients (critical fotoperíodo, accumulation of days fototermais), determination of the interception coefficients (efficiency of use of the radiation fotossinteticamente activates, coefficient of extinction of the culture) certain starting from the experimental and bibliographical data, he/she grew in the program Stella 5.0 a mathematical model of development of the soy, as well as an accumulation model and partition of the mass evaporates accumulated for the part area of the culture. After took place the simulations of the potential production of the soy for the two agricultural years in study, with the experimental planting dates and with premature dates with relationship to accomplished them in the experiments, as well as simulations were accomplished with other agricultural years (1981/82, 1982/83, 1983/84 e 1984/85) using the dates of sementeira of the experiments of 2004/05 and 2005/06. through the analysis of the simulations it was observed that the mathematical model can be used for the climatological conditions of the Northwest area of the State, presenting an estimate of data suitable with the data obtained to field.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Relação entre Fotoperíodo (h) e desvio padrão do somatório do Índice Fototérmico da VE – R1 do ano agrícola de 2004/05 .....64
- Figura 2 – Relação entre Fotoperíodo (h) e desvio padrão do somatório do Índice Fototérmico da VE – R1 do ano agrícola de 2005/06.....64
- Figura 3 - Relação entre IAF estimado e IAF observado com o Acúmulo de dias fototermais no experimento de 2004/05 em Augusto Pestana - RS.....68
- Figura 4 -



Figura 10 - Análise de Regressão da relação entre massa seca total acumulada pela parte aérea da cultura (MS <sub>total</sub> ) e massa seca vagem (MS <sub>vagem</sub> ) da soja da variedade IAS 5 para a determinação do coeficiente empírico do modelo matemático para o subperíodo R5 e R7.....	80
Figura 11 – Distribuição da Massa Seca acumulada pela parte aérea da cultura da soja da variedade IAS 5 estimada pelo modelo matemático (est) e observada (obs) no plantio do dia 19/11/04 do ano agrícola de 2004/05.....	81
Figura 12 – Distribuição da Massa Seca acumulada pela parte aérea da cultura da soja da variedade IAS 5 estimada pelo modelo matemático (est) e observada (obs) no plantio do dia 12/12/04 do ano agrícola de 2004/05.....	81
Figura 13 – Distribuição da Massa Seca acumulada pela parte aérea da cultura da soja da variedade IAS 5 estimada pelo modelo matemático (est) e observada (obs) no plantio do dia 14/01/05 do ano agrícola de 2004/05. ....	82
Figura 14 – Distribuição da Massa Seca acumulada pela parte aérea da cultura da soja da variedade IAS 5 estimada pelo modelo matemático (est) e observada (obs) no plantio do dia 12/12/05 do ano agrícola de 2005/06. ....	82
Figura 15 – Distribuição da Massa Seca acumulada pela parte aérea da cultura da soja da variedade IAS 5 estimada pelo modelo matemático (est) e observada (obs) no plantio do dia 26/12/05 do ano agrícola de 2005/06. ....	83
Figura 16 – Distribuição da Massa Seca acumulada pela parte aérea da cultura da soja da variedade IAS 5 estimada pelo modelo matemático (est) e observada (obs) no plantio do dia 13/01/06 do ano agrícola de 2005/06. ....	83
Figura 17 – Distribuição da Massa Seca acumulada pela parte aérea da cultura da soja da variedade IAS 5 estimada pelo modelo matemático (est) e observada (obs) no plantio do dia 31/12/06 do ano agrícola de 2005/06. ....	

### **Anexos**

Figura 1 – Simulação no modelo matemático de 2004/05 do IAF da soja da variedade IAS 5 utilizando outras épocas de semeadura .....	102
--	-----

Figura 2 – Simulação no modelo matemático de 2004/05 da Massa Seca Acumulada pela parte área da cultura da soja da variedade IAS 5 utilizando outras datas de semeadura.....	102
Figura 3 - Simulação no modelo matemático de 2004/05 da Distribuição Massa Seca Acumulada pela parte aérea da cultura da soja na semeadura aos 289 Dias Julianos.....	103
Figura 4 - Simulação no modelo matemático de 2004/05 da Distribuição Massa Seca Acumulada pela parte aérea da cultura da soja na semeadura aos 303 Dias Julianos.....	103
Figura 5 - Simulação no modelo matemático de 2004/05 da Distribuição Massa Seca Acumulada pela parte aérea da cultura da soja na semeadura aos 316 Dias Julianos.....	104
Figura 6 – Simulação no modelo matemático de 2005/06 do IAF da soja da variedade IAS 5 utilizando outras datas de semeadura.....	104
Figura 7 – Simulação no modelo matemático de 2004/05 da Massa Seca Acumulada pela parte área da cultura da soja utilizando outras datas de semeadura.....	105
Figura 8 - Simulação no modelo matemático de 2005/06 da Distribuição Massa Seca Acumulada pela parte aérea da cultura na semeadura aos 298 Dias Julianos.....	105
Figura 9 - Simulação no modelo matemático de 2005/06 da Distribuição Massa Seca Acumulada pela parte aérea da cultura na semeadura aos 319 Dias Julianos.....	106
Figura 10 - Simulação no modelo matemático de 2005/06 da Distribuição Massa Seca Acumulada pela parte aérea da cultura na semeadura aos 335 Dias Julianos.....	106
Figura 11- Simulação do IAF da cultura da soja da variedade IAS 5 no ano agrícola de 1981/82.....	107
Figura 12- Simulação da Massa Seca Acumulada pela parte área da cultura no ano agrícola de 1981/82.....	107
Figura 13- Simulação da Distribuição da Massa Seca Acumulada pela parte área da cultura na semeadura aos 323 Dias Julianos do anos agrícola de 1981/82.....	109
Figura 14- Simulação da Distribuição da Massa Seca Acumulada pela parte área da cultura na semeadura aos 346 Dias Julianos do anos agrícola de 1981/82.....	109

Figura 15- Simulação da Distribuição da Massa Seca Acumulada pela parte área da cultura na semeadura aos 360 Dias Julianos do anos agrícola de 1981/82.....	110
Figura 16- Simulação da Distribuição da Massa Seca Acumulada pela parte área da cultura na semeadura aos 13 Dias Julianos do anos agrícola de 1981/82.....	110
Figura 17- Simulação da Distribuição da Massa Seca Acumulada pela parte área da cultura na semeadura aos 14 Dias Julianos do anos agrícola de 1981/82.....	111
Figura 18- Simulação da Distribuição da Massa Seca Acumulada pela parte área da cultura na semeadura aos 31 Dias Julianos do anos agrícola de 1981/82.....	111
Figura 19- Simulação do IAF da cultura da soja da variedade IAS 5 no ano agrícola de 1982/83.....	112
Figura 20- Simulação da Massa Seca Acumulada pela parte área da cultura no ano agrícola de 1982/83.....	112
Figura 21- Simulação da Distribuição da Massa Seca Acumulada pela parte área da cultura na semeadura aos 323 Dias Julianos do anos agrícola de 1982/83.....	113
Figura 22- Simulação da Distribuição da Massa Seca Acumulada pela parte área da cultura na semeadura aos 346 Dias Julianos do anos agrícola de 1982/83.....	113
Figura 23- Simulação da Distribuição da Massa Seca Acumulada pela parte área da cultura na semeadura aos 360 Dias Julianos do anos agrícola de 1982/83.....	114
Figura 24- Simulação da Distribuição da Massa Seca Acumulada pela parte área da cultura na semeadura aos 13 Dias Julianos do anos agrícola de 1982/83.....	114
Figura 25- Simulação da Distribuição da Massa Seca Acumulada pela parte área da cultura na semeadura aos 14 Dias Julianos do anos agrícola de 1982/83.....	115
Figura 26- Simulação da Distribuição da Massa Seca Acumulada pela parte área da cultura na semeadura aos 31 Dias Julianos do anos agrícola de 1982/83.....	
Figura 27- Simulação do IAF da soja da variedade IAS 5 no ano agrícola de 1983/84.....	116
Figura 28- Simulação da Massa Seca Acumulada pela parte área da cultura no ano agrícola de 1983/84.....	116

Figura 29- Simulação da Distribuição da Massa Seca Acumulada pela parte área da cultura na semeadura aos 323 Dias Julianos do anos agrícola de 1983/84.....	117
Figura 30- Simulação da Distribuição da Massa Seca Acumulada pela parte área da cultura na semeadura aos 346 Dias Julianos do anos agrícola de 1983/84.....	117
Figura 31- Simulação da Distribuição da Massa Seca Acumulada pela parte área da cultura na semeadura aos 360 Dias Julianos do anos agrícola de 1983/84.....	118
Figura 32- Simulação da Distribuição da Massa Seca Acumulada pela parte área da cultura na semeadura aos 13 Dias Julianos do anos agrícola de 1981/82.....	118
Figura 33- Simulação da Distribuição da Massa Seca Acumulada pela parte área da cultura na semeadura aos 14 Dias Julianos do anos agrícola de 1983/84.....	119
Figura 34- Simulação da Distribuição da Massa Seca Acumulada pela parte área da cultura na semeadura aos 31 Dias Julianos do anos agrícola de 1983/84.....	119
Figura 35- Simulação do IAF da soja da variedade IAS 5 no ano agrícola de 1984/85.....	120
Figura 36- Simulação da Massa Seca Acumulada pela parte área da cultura no ano agrícola de 1984/85.....	120
Figura 37- Simulação da Distribuição da Massa Seca Acumulada pela parte área da cultura na semeadura aos 323 Dias Julianos do anos agrícola de 1984/85.....	121
Figura 38- Simulação da Distribuição da Massa Seca Acumulada pela parte área da cultura na semeadura aos 346 Dias Julianos do anos agrícola de 1984/85.....	121
Figura 39- Simulação da Distribuição da Massa Seca Acumulada pela parte área da cultura na semeadura aos 360 Dias Julianos do anos agrícola de 1984/85.....	122
Figura 40- Simulação da Distribuição da Massa Seca Acumulada pela parte área da cultura na semeadura aos 13 Dias Julianos do anos agrícola de 1984/85.....	122
Figura 41- Simulação da Distribuição da Massa Seca Acumulada pela parte área da cultura na semeadura aos 14 Dias Julianos do anos agrícola de 1984/85.....	123
Figura 42- Simulação da Distribuição da Massa Seca Acumulada pela parte área da cultura na semeadura aos 31 Dias Julianos do anos agrícola de 1984/85.....	123

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1: Estádios vegetativos e reprodutivos da soja.....	24
Tabela 1.2: Assunções para obtenção do modelo do co-seno.....	33
Tabela 1.3: Graus dias acumulados e Acúmulo de Dias Fototermais nos diferentes períodos de desenvolvimento da soja da variedade IAS 5 para as datas de semeadura utilizadas no experimento de 2004/05 em Augusto Pestana - RS.....	62
Tabela 1.4: Graus dias acumulado e Acúmulo de Dias Fototermais nos diferentes períodos de desenvolvimento da soja da variedade IAS 5 para as datas de semeadura utilizadas no experimento de 2005/06 em Augusto Pestana - RS.....	62
Tabela 1.5: Comparação entre as datas observadas e estimadas dos estádios fenológicos V6, R1, R5 e R7 em soja da variedade IAS 5 no experimento de 2004/05 em Augusto Pestana - RS.....	65
Tabela 1.6: Comparação entre as datas observadas e estimadas para os estádios fenológicos V6, R1, R5 e R7 em soja da variedade IAS 5 no experimento de 2005/06 em Augusto Pestana - RS .....	66
Tabela 1.7: Índices que originaram os valores médios de Acúmulo de Dias Fototermais para cultura da soja da variedade IAS 5 nos dois anos agrícolas.....	67
Tabela 1.8: Graus dias acumulados em cada subperíodo avaliado em soja da variedade IAS 5 nos experimentos de 2004/05 e 2005/06 em Augusto Pestana -RS.....	69
Tabela 1.9: Índice de Área Foliar (IAF) observado e estimado da soja da variedade IAS 5 no ano agrícola de 2004/05.....	70

Tabela 1.10: Índice de Área Foliar (IAF) observado e estimado da soja da variedade IAS 5 no ano agrícola de 2005/06.....	71
Tabela 1.11: Radiação fotossinteticamente ativa interceptada (RFAint) acumulada pela soja da variedade IAS 5 em cada subperíodo nos experimentos de 2004/05 e 2005/06, em Augusto Pestana - RS.....	72
Tabela 1.12: Eficiência de uso da RFAint da nos experimentos de 2004/05 e 2005/06 em Augusto Pestana - RS.....	72
Tabela 1.13: Radiação Fotossinteticamente Ativa Incidente (RFAinc) nos anos agrícolas de 2004/05 e 2005/06.....	73
Tabela 1.14: Índice de Colheita (Ic) em soja observado (obs) e estimado (estim) nos anos agrícolas de 2004/05 e 2005/06.....	85
Tabela 1.15: Parâmetros estimados pelo modelo matemático no ano agrícola de 1981/82.....	86
Tabela 1.16: Parâmetros estimados pelo modelo matemático no ano agrícola de 1982/83.....	86
Tabela 1.17: Parâmetros estimados pelo modelo matemático no ano agrícola de 1983/84.....	87
Tabela 1.18: Parâmetros estimados pelo modelo matemático no ano agrícola de 1984/85.....	87

## LISTA DE SÍMBOLOS

EUR	eficiência de uso da radiação fotossinteticamente ativa interceptada ( $\text{MJ.m}^{-2}$ )
MSacum	peso da massa seca acumulada pela parte aérea da cultura ( $\text{Kg. ha}^{-1}$ )
RFAint	radiação fotossinteticamente ativa interceptada pela cultura ( $\text{MJ.m}^{-2}$ )
RFA	radiação fotossinteticamente ativa ( $\text{MJ.m}^{-2}$ )
Rg	radiação global ( $\text{MJ.dia}^{-1}$ )
Eint	eficiência de interceptação da radiação fotossinteticamente ativa
K	coeficiente de extinção da cultura
IAF	índice de área foliar
RFAinc	radiação fotossinteticamente ativa incidente ( $\text{MJ.m}^{-2}$ )
RFAat	radiação fotossinteticamente ativa transmitida pela cultura ( $\text{MJ.m}^{-2}$ )
b	coeficiente angular da equação
AFam	área foliar da amostra ( $\text{cm}^2$ )
S	área do terreno amostrado ( $\text{cm}^2$ )
MSam	peso da massa seca área da amostra ( $\text{Kg}$ )
AFesp	área foliar específica ( $\text{cm}^2.\text{Kg}^{-1}$ )
AFfoto	área foliar da foto ( $\text{cm}^2$ )
MSfoto	peso da massa seca da foto ( $\text{Kg}$ )
$\text{GD}_i$	graus-dia no i-éssimo dia ( $^{\circ}\text{C.dia}^{-1}$ )
c	máxima velocidade de instalação da cultura
$a_n$	coeficiente para o n-éssimo dia do período
R(i)	índice de dias fototermais no i-éssimo dia
$\text{Tmáx}_i$	temperatura máxima registrada no dia i ( $^{\circ}\text{C}$ )
$\text{Tmín}$	temperatura mínima registrada no dia i ( $^{\circ}\text{C}$ )
Tb	temperatura basal da soja ( $^{\circ}\text{C}$ )

GDA	graus-dia acumulados ( $^{\circ}\text{C} \cdot \text{dia}^{-1}$ )
$\bar{T}_i$	temperatura média do ar no dia i ( $^{\circ}\text{C}$ )
CFT	constante fototérmica
Fr(T)	função da temperatura
F(N)	função do comprimento da noite
Tot	temperatura ótima ( $^{\circ}\text{C}$ )
Nmín	comprimento mínimo da noite (h)
Not	comprimento ótimo da noite (h)
ES <sub>i</sub>	escotofase no i-éssimo dia (h)
Fp <sub>i</sub>	fotoperíodo no i-éssimo dia (h)
Hp <sub>i</sub>	ângulo do pôr do sol no i-éssimo dia (graus e décimos)
Dj	dia juliano
MSv	massa seca de vagem
MStotal	massa seca total acumulada pela parte área da cultura



## LISTA DE LETRAS GREGAS

- $\alpha$      coeficiente que exprime a fração de radiação fotossinteticamente ativa em radiação global
- $\gamma$      latitude de uma determinada região (graus e décimos)
- $\sigma_i$     declínio do sol no i-ésimo dia (graus e décimos)

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	17
<b>1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>20</b>
<i>1.1. MODELAGEM MATEMÁTICA EM POPULAÇÕES DE PLANTAS: IMPORTÂNCIA E HISTÓRICO.....</i>	<i>20</i>
<i>1.2 MODELO MATEMÁTICO DE ACÚMULO POTENCIAL DE BIOMASSA –PRINCÍPIOS E FATORES QUE AFETAM SEUS COEFICIENTES.....</i>	<i>25</i>
<i>1.2.1 Modelo Matemático da Taxa de Produção.....</i>	<i>26</i>
<i>1.2.2 Modelo Matemático-Fisiológico.....</i>	<i>28</i>
<i>1.2.3 Modelo Cossemoidal.....</i>	<i>32</i>
<i>1.2.4 Balanço entre Fotossíntese e Respiração.....</i>	<i>35</i>
<b>1.3 MODELO MATEMÁTICO DE DISTRIBUIÇÃO DE BIOMASSA - PRINCÍPIOS E FATORES QUE AFETAM SEUS COEFICIENTES.....</b>	<b>36</b>
<b>2 O MODELO MATEMÁTICO.....</b>	<b>38</b>
<i>2.1 Modelo Energético.....</i>	<i>39</i>
<i>2.1.1 Submodelo de Distribuição.....</i>	<i>53</i>
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>55</b>
<i>3.1 Local, clima e solo.....</i>	<i>55</i>
<i>3.2 Delineamento Experimental e Tratamentos.....</i>	<i>56</i>
<i>3.3 Condução do experimento.....</i>	<i>57</i>
<i>3.4 Determinações e Amostragens.....</i>	<i>58</i>
<i>3.5 Estimativa dos Coeficientes para a Modelagem.....</i>	<i>58</i>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>61</b>
CONCLUSÃO.....	88
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	89
ANEXOS.....	10

## INTRODUÇÃO

A soja é uma cultura que se destaca pela sua versatilidade, podendo ser utilizada tanto para alimentação humana, como animal e para vastas áreas dentro das indústrias, sendo usada desde a confecção de tintas até a produção de conservantes de produtos enlatados e recentemente de biocombustível. Além de ser objeto de muitas pesquisas na área da saúde, mais precisamente na prevenção e doenças.

A soja foi introduzida no Brasil em fins do século passado. Até a década de 40, sua importância econômica era tão insignificante no contexto agrícola nacional, devido ao pequeno volume produzido, não sendo citado nos levantamentos estatísticos. A sua expansão aconteceu nas décadas de 70 e 80, com o seu cultivo concentrado nos Estados tradicionais da região Sul.

A cultura da soja ocupa posição de destaque no cenário agrícola brasileiro e dentre os Estados de maior tradição agrícola o Rio Grande do Sul é um dos maiores produtores e exportadores deste grão. O Estado é responsável por 20% da produção nacional da soja (MELO, 2005).

É atualmente o quarto grão mais produzido no mundo, atrás do milho, trigo e arroz, sendo assim, a oleaginosa mais cultivada. No Rio Grande do Sul é a cultura que detém a maior área de plantio, ocupando uma área de 3.965.250 hectares, tendo gerado uma produção de 9.579.293 toneladas na safra 2003/04 (COSTAMILAN E BERTAGNOLI, 2004).

A região Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul tem a produção de soja como sua principal base econômica, e essa cultura apresentando expansão importante em sua área de cultura em sua produtividade. Este cenário agrícola satisfatório é resultado de fatores como: boa tecnologia empregada no cultivo, cautela na armazenagem e transporte dos grãos; práticas de manejo adequadas, entre elas, definição criteriosa da época de semeadura, escolha dos cultivares com grande potencial genético, utilização dos espaçamentos e densidades adequadas no plantio, controle de plantas daninhas, pragas e doenças; e por fim, pelas condições favoráveis do solo e do

clima da região. De acordo com Schöffel (2002) a máxima produtividade econômica fundamenta-se, na perfeita integração entre a planta, o ambiente e o manejo utilizado.

Uma ferramenta muito importante para o estudo do crescimento, desenvolvimento e produtividade de uma cultura é o uso de modelagem matemática, a qual permite a descrição de todo o processo evolutivo do sistema, e permite, ainda, a simulação de situações que tornam possível à tomada de decisões antes do começo do plantio, obtendo-se o melhor resultado possível. Um instrumento importante para descrevermos o processo evolutivo da cultura de soja é a construção de Modelos Matemáticos que possibilitam o estudo de sistemas reais complexos. Estes exigem modelos com integração coerentes, banco de dados contendo informações experimentais e edafoclimáticas, além de permitir prever as produtividades de variedades de soja previamente calibradas em ensaios de campo em alocações em vários ambientes. (Costa, 1997).

Os modelos de simulação de culturas são instrumentos que permitem gerar cenários, considerando as diversas combinações dos fatores que determinam a produtividade potencial da cultura. Estes apresentam potencial de uso para responder questões em pesquisa, manejo de culturas e planejamento, auxiliando no entendimento sobre as interações genéticas, fisiológicas e ambientais, como também nas decisões de práticas culturais antes e durante o período da cultura no campo, como aplicação de fertilizantes e irrigação.

O presente trabalho de pesquisa traz como problema central o ajuste do modelo matemático de simulação do desenvolvimento de populações de soja, do acúmulo potencial de massa seca na parte aérea da cultura e partição desta em folhas, caule e frutos (vagem). Os parâmetros de entrada do modelo são as variáveis meteorológicas de radiação solar e temperaturas médias diárias, além do fotoperíodo, parâmetro este que varia de forma previsível de acordo com a latitude do local. Para este ajuste será necessário: a determinação dos coeficientes genéticos (necessidades fototérmicas da variedade); a determinação dos coeficientes de interceptação; estimar a velocidade de desenvolvimento e de instalação da área foliar da cultivar frente às condições ambientais; desenvolver no programa Stella 5.0 um modelo de desenvolvimento da soja; desenvolver simulações de efeitos de diferentes ambientes sobre o desempenho da cultura.

Este trabalho faz parte da linha de pesquisa Modelagem Matemática de Sistemas Complexos, do Mestrado em Modelagem Matemática da UNIJUÍ.

A dissertação é composta por quatro capítulos, em que:

No capítulo 1 é apresentada a revisão bibliográfica sobre a Modelagem Matemática em populações de plantas com sua importância e histórico; Modelos Matemáticos de Acúmulo Potencial de Biomassa - princípios e fatores que afetam seus coeficientes; Modelo de distribuição de Biomassa – princípios e fatores que afetam seus coeficientes.

No capítulo 2 é feita a apresentação do modelo matemático, este que é constituído pelo modelo energético e o Submodelo de Distribuição de Massa Seca pela parte área da cultura.

No terceiro capítulo é descrito o material e métodos utilizados para a determinação de todos os parâmetros necessários para o que foi proposto neste trabalho.

No capítulo 4 são apresentados os resultados e discussões a cerca do tema proposto.

## **1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo é apresentada uma breve revisão bibliográfica sobre Modelagem Matemática com seus principais conceitos e importância, além da apresentação de alguns modelos matemáticos de acúmulo e distribuição de massa seca em populações de soja.

### ***1.1. MODELAGEM MATEMÁTICA EM POPULAÇÕES DE PLANTAS: IMPORTÂNCIA E HISTÓRICO***

A Modelagem consiste, essencialmente, na arte de transformar situações da realidade em problemas matemáticos cujas soluções devem ser interpretadas na linguagem usual. É uma forma de abstração e generalização com a finalidade de previsão de tendências (BASSANEZI, 2002).

Através da análise das repercussões dos diferentes cenários sobre os sistemas de produção, é possível compreender alguns processos que ocorrem dentro do sistema e as interações entre os seus componentes, sendo que a modelagem pode auxiliar no processo de tomada de decisão, na identificação de propriedades emergentes, na quantificação dos processos e na identificação de áreas carentes de informação e/ou pesquisa (MEDEIROS, 2003).

Um modelo é definido como uma representação simplificada de um sistema, um modelo matemático é essa representação descrita em linguagem matemática e a modelagem é o processo de desenvolvimento desta representação (BOOTE et al, 1987). Para Vogt (2002) um modelo é a representação de um sistema em determinada forma de linguagem, não necessariamente a linguagem matemática. A escolha da forma de descrição mais fidedigna à representação pretendida do sistema está diretamente associada aos interesses envolvidos no estudo por modelagem. Qualquer conjunto de regras e relações que descrevem algo pode ser considerado um modelo (SANTOS, 2002).

Conforme Detomini (2004) os modelos matemáticos se referem a uma ordem de grandeza a ser estimada, a qual deverá ser comparada com observações de situações reais para que então possam ser validados para diversas simulações.

Já sistema é definido por Boote et al, 1987 como sendo uma coleção de componentes e as suas relações mútuas se agrupam com a finalidade de estudar alguma parte do mundo real. Os sistemas são estruturas autônomas e complexas, que apresentam limites determinados pelas interações entre os seus componentes e processos que ocorrem em seu interior (BARIONI et al, 2002). Os limites definem as variáveis de entrada, de saída e/ou os parâmetros dos componentes do modelo. A complexidade do sistema é determinada pela quantidade de níveis de organização do mesmo (LOVATTO, 2002).

A quantidade e organização dos componentes e os processos que ocorrem no interior do sistema e suas propriedades emergentes vão modular as respostas (mudanças no comportamento) desse, em função de alterações nos seus limites (BARIONI et al., 2002; LOVATTO, 2002).

Os modelos matemáticos de sistemas biológicos podem ser simples como uma equação que relaciona uma variável à outra, ou podem ser complexos envolvendo a interação de muitas equações apresentando variáveis interdependentes. Os modelos podem crescer em complexidade, tanto no ponto de vista matemático quanto biológico, envolvendo os diversos processos biológicos que podem influenciar uma variável (por exemplo, produção).

Boote et al (1996) destaca a importância do desenvolvimento de modelos no meio científico, ressaltando como principais razões para isto: que os modelos são ferramentas importantes para sumarizar o conhecimento científico e auxiliam na tomada de decisão agrícola, ou seja, serve como instrumento para o manejo e elaboração de atividades de planejamento na agricultura. Para Costa (1997) além disso, também o desenvolvimento de modelos representa um grande potencial didático na organização do conhecimento, através da orientação e a racionalização do uso de experimentos convencionais, pois sem dúvidas o desenvolvimento e a aplicação de modelos de simulação em conjunto com a experimentação convencional em maior escala é um desafio que devemos seguir e é o que tornará nossas atividades científicas mais eficientes.

O desenvolvimento e a utilização de modelos matemáticos pode disponibilizar aos tomadores de decisão, uma ferramenta para estimar o comportamento do sistema face à

determinadas situações criadas pelo usuário do modelo. Deste modo se pode realizar várias simulações e escolher, por exemplo, a alternativa que minimiza o risco ou a variância da resposta do sistema à decisão tomada (DOURADO NETO et al, 1998; FIALHO, 1999).

A modelagem matemática oferece-se como um importante mecanismo para o planejamento do futuro, com resultados tanto mais acertados quanto maior for o número de variáveis pertinentes com que o modelo trabalha e maior for à capacidade de formulação e análise das tendências que ela estabelece (VOGT, 2002). Contudo, através da modelagem matemática é possível também tratar um problema complexo abstraindo-o para um mais simples, comensurável, isto é, com um número de variáveis determinado, com regras de relação precisas e claras, e conseqüente capacidade de representação do problema tratado.

Monteith (1981) constata que a complexificação dos modelos existentes com a inclusão de novas variáveis e submodelos não determina a existência de melhoria na eficiência dos modelos, independentemente do seu tipo. Devido a isto, alertou que as pesquisas deveriam fazer esforços para condensar seus modelos, para isto, restringindo os algoritmos para a mínima compreensão do mesmo, permitindo explorar o problema estudado do modo mais simples possível e fazendo com que as estruturas dos modelos sejam mais adaptáveis as interações complexas, introduzindo novas idéias e desenvolvendo as necessidades apresentadas (MONTEITH, 1996).

Para Jones (1993) realmente os sistemas solo-planta-atmosfera é muito complexo, pois inúmeros fatores irão influenciar nos resultados obtidos na modelagem deste sistema. Os avanços computacionais mostram-se como uma nova possibilidade durante o processo de modelagem no meio biológico, por ser uma ferramenta eficaz na determinação e combinação destes fatores.

A utilização da computação na formulação de modelos para a simulação do desenvolvimento de culturas e estimativa de produtividade surgiu por volta da década de 70, quando sistemas de análise e computadores surgiram como novas ferramentas de trabalho e análise para os pesquisadores (MELO, 2005).

A modelagem do crescimento e produtividade das plantas é de grande importância para estudos das respostas das culturas às alterações climáticas bem como a estimativa de rendimento potencial das culturas. A radiação fotossinteticamente ativa é um parâmetro indispensável nos



modelos que visam quantificar a produção de massa seca e a eficiência fotossintética das plantas (FRANÇA, 1997).

Para Costa (1997) a utilização de modelos objetivando quantificar os efeitos das variáveis ambientais sobre o crescimento e desenvolvimento das culturas vem ocorrendo a mais de 250 anos. O primeiro trabalho foi realizado por Réamur, em 1735, em que fez a associação entre a temperatura (graus-dia) e o desenvolvimento de culturas, ele estava propondo um dos modelos empíricos mais eficientes que se conhece em agrometeorologia.

Durante o processo de modelagem de um sistema de populações de plantas, são constatadas diversas hipóteses simplificadas, devido à impossibilidade de considerar todos os detalhes do modelo (DALLACORT, 2005). Um dos fatores importantes a ser considerado na modelagem destes sistemas é a variabilidade climática sobre a produção vegetal, além é claro de aspectos relevantes da interação clima-planta-solo, de forma qualitativa e quantitativa, tendo em vista o resultado final procurado: rendimentos esperados, as datas de ocorrência das fases fenológicas de crescimento das espécies cultivadas, a produtividade final, as reservas de umidade do solo, as datas previstas de maturação e de colheita.

Há muito tempo, estuda-se os efeitos do ambiente e suas interações sobre o desenvolvimento fenológico das plantas. São considerados mais importantes os seguintes fatores do meio: Temperatura do ar, fotoperíodo, regime pulviométrico e a ocorrência de frio (BERGAMASCHI, 2006).

Hoje, para inúmeras espécies vegetais, existem escalas que possibilitam descrever e reproduzir com detalhes o ciclo de uma planta, através de estádios muito bem caracterizados. Os estádios surgiram pela necessidade de detalhar de maneira clara e objetiva as etapas de desenvolvimento das plantas, na elaboração das chamadas ESCALAS FENOLÓGICAS. A caracterização fenológica através de estádios permite maior detalhamento na descrição do ciclo da planta. Assim, torna-se possível utilizar a fenologia para finalidades bem mais específicas, como em adubações de cobertura, ou na observação de um evento importante qualquer como uma geada ou um estresse hídrico (BERGAMASCHI, 2006).

De acordo com Neumaier et al.(2000), a metodologia de descrição dos estádios de desenvolvimento proposta por Fehr & Caviness<sup>1</sup>(1977) é a mais difundida e utilizada a nível mundial. O sistema divide os estádios de desenvolvimento da soja em estádios vegetativos e reprodutivos, (Tabela 1.1).

**Tabela 1.1: Estádios vegetativos e reprodutivos da soja**

<b>Estádios vegetativos</b>	<b>Estádios Reprodutivos</b>
VE – Emergência	R1 - Início do florescimento
VC – Cotilédone	R2 - Pleno florescimento
V1 - Primeiro nó com folha expandida	R3 – Início da formação de vagens
V2 - Segundo nó	R4 - Plena formação de vagens
V3 - Terceiro nó	R5 – Início do enchimento de grãos
*	R6 – Pleno enchimento de grãos
*	R7 - Início da maturação
V(n) - enésimo nó	R8 - Maturação plena

Atualmente, o conhecimento interdisciplinar permite simulações das dinâmicas de crescimento das culturas e de sistemas agrícolas (JAME; CUTFORTH, 1996). Normalmente, para se agregar todas estas áreas do conhecimento, para facilitar o entendimento e construção do modelo , estes são subdivididos em submodelos (BOOTE et al, 1996).

<sup>1</sup>FEHR, W.R.; CAVINESS, C.E. **Stages of soybean development**. Ames: Iowa State University of Science and Technology, 1977. 11p.(Special Report 80).

O uso de modelos de simulação de culturas tem aumentado significativamente, devido à melhoria de técnicas de modelagem e da maior capacidade dos computadores em realizar os cálculos (RITCHIE, 1991; PENNING DE VRIES et al, 1991). Apesar disto à modelagem esta em fase inicial de desenvolvimento, uma vez que muitos modelos simulam apenas os principais fatores que afetam as culturas, por exemplo, clima, água, disponibilidade de nitrogênio no solo e carbono para a fotossíntese. Avanços em modelagem poderão incluir outros fatores como efeito do preparo da terra, pragas, doenças, ervas daninhas, excesso de água, entre outros (JAME; CUTFORTH, 1996).

## **1.2 MODELO MATEMÁTICO DE ACÚMULO POTENCIAL DE BIOMASSA – PRINCÍPIOS E FATORES QUE AFETAM SEUS COEFICIENTES**

Durante a fotossíntese a energia luminosa gerada pelo sol promove um processo no interior da planta, em que o dióxido de carbono proveniente do ar, junto com a água proveniente do solo combinam-se para produzir açúcares. Esses açúcares produzidos pela fotossíntese, junto com os nutrientes minerais obtidos do solo, são os ingredientes básicos necessários para a elaboração dos carboidratos, proteínas e lipídios da matéria seca.

O carbono assimilado, não perdido pela respiração aumenta a matéria seca de uma planta. Pode ser usado para o crescimento e para o estabelecimento de reservas. A acumulação de carbono é discernível como um aumento de massa. Este pode ser medido, diretamente, pesando-se as plantas colhidas e secas. O aumento na massa de uma planta devido aos produtos de assimilação é denominado produção de matéria seca (LARCHER, 1986).

Segundo Pereira & Machado (1987) o desenvolvimento de culturas anuais pode ser dividido em três partes: (a) inicial: crescimento lento (momento do estabelecimento); (b) intermediária: crescimento rápido (consolidação da cultura); (c) final: maturação (crescimento pequeno ou nulo). A taxa de crescimento da cultura é definida pela variação da massa seca com o tempo e representa a capacidade de produção de fitomassa. Essa taxa é composta por todas as partes da planta ou pode ocasionalmente ser dividida para efeito de estimativa através de modelos matemáticos.

Para estimar alguns índices fisiológicos, se faz necessário conhecer a variação temporal da massa seca e do índice de área foliar. Na avaliação da massa seca deve haver uma padronização dos métodos de secagem do material, pois a quantidade de água no tecido vegetal varia com a hora do dia, com as condições ambientais e com o estágio de desenvolvimento da planta. A variação temporal da área foliar em geral aumenta até um máximo, onde permanece por algum tempo, decrescendo em seguida, devido à senescência das folhas velhas. Como a fotossíntese depende da área foliar, o rendimento da cultura será maior quanto mais rápido a planta atingir o índice de área foliar máximo e quanto mais tempo à área foliar permanecer ativa (Pereira & Machado, 1987).

### ***1.2.1 Modelo Matemático da Taxa de Produção***

Larcher (1986) propôs um modelo matemático que define a taxa de produção (TP), ou produtividade, e expressa o aumento de matéria seca por unidade de tempo (dia, semana), durante o período de produção. A taxa de produção de plantas isoladas pode ser dada em termos da “taxa de assimilação líquida” (TAL) ou da “taxa de crescimento relativo” (TCR). E para a determinação da taxa de assimilação líquida, já em 1926, Gregory havia determinado que esta representaria o aumento na matéria seca, (dP), durante um intervalo de tempo (dt), referente à área de assimilação A, cuja atividade fotossintética é responsável pelo ganho em matéria, conforme a equação a seguir:

$$TP_{\text{como TAL}} = \frac{dP}{dt} \cdot \frac{1}{A} \quad (1.1)$$

A TAL é dada em g ou mg de matéria seca ou carbono, por dm<sup>2</sup> de área foliar de uma planta e por dia ou semana. A fórmula acima considera as taxas instantâneas, admitindo-se que a área da folha permanece constante durante a acumulação de matéria. Tal não é, porém, o caso porque a área total da folha também continua a crescer.

Pretendendo mais tarde definir a taxa média de crescimento Watson (1947) formulou a seguinte equação:

$$TAL = \frac{P_2 - P_1}{A_2 - A_1} \cdot \frac{\ln\left(\frac{A_2}{A_1}\right)}{t_2 - t_1} \quad (1.2)$$

onde:

$P_1$  e  $A_1$  são o peso seco e a área foliar, respectivamente, da planta total, no tempo  $t_1$ ,  
 $P_2$  e  $A_2$  são o peso seco e a área foliar, respectivamente, no tempo posterior  $t_2$ .

Para as plantas herbáceas (plantas  $C_3$ , que são as gramíneas e as dicotiledôneas, ex: soja, alface, beterraba....) é geralmente escolhido um intervalo de tempo ( $t_2 - t_1$ ) de 1 a 2 semanas.

Essa equação resulta do cálculo do valor médio de  $TAL$ , durante o intervalo de tempo ( $t_2 - t_1$ ), admitindo-se que tanto  $A$  como  $P$  mudam linearmente com o tempo. A função logarítmica ( $\ln$ , log natural) surge quando a respectiva integral é avaliada.

A taxa de crescimento relativo  $TCR$  expressa o aumento em matéria seca por unidade de tempo, com relação ao peso seco inicial  $P$  da planta:

$$TP\text{como}TCR = \frac{dP}{dt} \cdot \frac{1}{P} \quad (1.3)$$

O “peso seco” aqui requerido é o da matéria orgânica da planta. Não é exato, pois, usar simplesmente o valor determinado pela pesagem da planta seca. Esta inclui não apenas compostos de carbono como, também, minerais (estes equivalem à cerca de 3 a 10% do peso seco total). Pode-se subtrair o peso das cinzas do peso seco da amostra total, depois de queimada a amostra.

As magnitudes das taxas de assimilação líquida mais altas possíveis e médias dependem, sobretudo, da constituição morfológica e fisiológica da planta. Os efeitos dos fatores ambientais sobre a troca de CO<sub>2</sub> e sobre o balanço de carbono afetaram conseqüentemente a produção de matéria seca. Sob crescente radiação (maior intensidade e/ou exposição mais prolongada) a produção é maior, mas se acontecer a deficiência de água e a provisão inadequada ou desequilibrada de nutrientes a produção de matéria seca diminuirá. Portanto, não é apenas a entrada de carbono que afeta o crescimento, como também os processos de transporte durante a assimilação e a atividade de crescimento, dos órgãos individuais (LARCHER, 1986).

### **1.2.2 Modelo Matemático-Fisiológico**

Já o modelo matemático-fisiológico empregado por Plá (1998) e desenvolvido anteriormente por Miglioranza (1992), este baseado em processos fisiológicos que permitem a compreensão das causas das respostas das plantas ao meio, apresenta-se mais completo do que o modelo anterior, pois utiliza durante a predição das taxas fotossintéticas e respiratórias a radiação solar global e temperaturas máxima, mínima e média diárias. Este modelo foi utilizado com a finalidade de simular o crescimento e a produtividade da cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L. cv. Negrito 897) em regiões de Minas Gerais. Uma estimativa da produção líquida de matéria seca foi feita em base diária, ou seja, um balanço entre ganho (fotossíntese) e perda (respiração).

A equação a seguir é uma das equações propostas por Miglioranza (1992) e utilizada por Plá (1998):

$$W_t = W_2 - W_1 \quad (1.4)$$

onde

$W_t$  representa o acúmulo de matéria seca de uma comunidade no tempo  $t$ ; a qual possuía uma massa  $W_1$ , no tempo  $t_1$ ; e em condições favoráveis cresceu e passou a ter uma massa  $W_2$ , no tempo  $t_2$ .

Como também este crescimento pode ser estimado pelo balanço entre o ganho, na fotossíntese bruta diária ( $P_{bd}$ ) e a perda na respiração total ( $R_t$ ), isto é:

$$w_T = Pbd - R_t \quad (1.5)$$

Para o cálculo da taxa de fotossíntese bruta diária ( $P_{bd}$ ) em  $\text{g.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ , foi usada a seguinte equação:

$$Pbd = Pbmd.W_f.f(I).f(L).f(IF).f(M).f(T).f(DH) \quad (1.6)$$

sendo

$Pbmd$  a produção fotossintética bruta máxima diária em  $\text{g.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ ;

$W_f$  a matéria seca das folhas em  $\text{g.m}^{-2}$ ;

$f(I)$  o fator de ajustamento para a densidade de fluxo de radiação solar global;

$f(L)$  o fator de ajustamento de índice de área foliar;

$f(IF)$  o fator de ajustamento da idade da folha;

$f(M)$  o fator de ajustamento da idade da planta;

$f(T)$  o fator de ajustamento da temperatura do ar;

$f(DH)$  o fator de ajustamento da disponibilidade hídrica.

Neste trabalho foram utilizados os fatores determinados por Miglioranza (1992).

Considerando-se as perdas, representadas pela respiração de crescimento e de manutenção, foi utilizada a seguinte equação desenvolvida por Thornley (1970, 1976):

$$R_t = (1 - Y_G) \cdot P_G + M_R \cdot Y_G \cdot W_t \quad (1.7)$$

em que

$R_t$  corresponde à respiração total, em  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ ;

$Y_G$  a eficiência de conversão de crescimento, em  $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  de  $W_t$  de substrato;

$P_b$ , a produção fotossintética bruta, em  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ ;

$M_R$ , o coeficiente de manutenção, em  $\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}$ ;

$W_t$  o acúmulo de matéria seca de uma comunidade de plantas, em  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ . Novamente os coeficientes utilizados foram obtidos por Miglioranza (1992).

Aos dados de matéria seca total ( $W_t$ ) foi ajustada equação logística de crescimento (Richards, 1969), utilizando-se um programa interativo para minimizar a variância residual. A equação usada foi:

$$W_t = \frac{W_m}{(1 + A \cdot e^{-B \cdot t})} \quad (1.8)$$

tal que:

$W_t$ , a produção de matéria seca total, em  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ ;

$W_m$ , a estimativa assintótica de crescimento máximo;

$t$  é os dias de crescimento;

$A, B$ , constantes de ajustamento e a base de logaritmos naturais, respectivamente.



Dentro de cada época de cultivo, foram ajustadas curvas logísticas de crescimento. A taxa de produção de matéria seca máxima ( $C_{tm}$ ) foi estimada empregando-se as derivadas das equações ajustadas ao peso de matéria seca ( $W_t$ ) em relação ao tempo (Radford, 1967; Richards, 1969). As taxas de produção potencial de matéria seca ( $C_{tp}$ ) foram determinadas utilizando-se a seguinte equação:

$$C_{tp} = \frac{0,06.Ra}{\delta} \quad (1.9)$$

em que

$Ra$  é radiação solar global média diária, em  $\text{cal.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ ;

$\delta$ , o valor calorífico da planta de feijão ( $\delta = 3,8 \text{ kcal.g}^{-1}$  de matéria seca), segundo Kvet et al. (1971);

0,06 é a eficiência potencial de conversão de energia solar ( $\xi = 6\%$  ou 0,06).

Também foram determinados os valores instantâneos da eficiência de conversão de energia solar ( $\xi$ ), por meio da seguinte equação:

$$\xi\% = \frac{(100.C_{tm}.d)}{Ra} \quad (1.10)$$

na qual:

$Ra$  representa o valor médio diário de radiação solar incidente no topo do dossel do feijoeiro, registrado nos cinco últimos dias anteriores ao  $C_{tm}$  correspondente. O valor calorífico (d) foi de  $3,8 \text{ kcal.g}^{-1}$  de matéria seca.

O modelo mostrou-se adequado para simular o crescimento e a produtividade da cultura do feijoeiro com base numa estimativa da produção líquida de matéria seca. Em todas as regiões, o período intermediário entre o plantio das “águas” e o da “seca” parece ser o mais indicado para o cultivo, pois o modelo estimou um bom crescimento e uma alta produtividade do feijoeiro. Grande produção de biomassa e de sementes foi obtida por simulação nas condições de duas das cidades. A relação entre as taxas de produção de matéria seca máxima e potencial variou entre 18 e 22%, em todas as épocas de plantio. Os valores de  $W_t$  obtidos estão na faixa dos encontrados por Resende et al. (1981) e Miglioranza (1992), mas superiores ao máximo de  $300 \text{ g.m}^{-2}$ , encontrados por Araújo et al. (1987) e Stone et al. (1988). A grande vantagem do emprego desse modelo é o pequeno número de variáveis utilizadas.

### 1.2.3 Modelo Cossenoidal

Pimenta et al. (1999), propôs o modelo do co-seno para prever a variação temporal diária da massa de matéria seca relativa total ( $Wr_i$ ) da parte aérea da planta e massa de matéria seca de folhas da cultura do feijão. A principal diferença entre o modelo do co-seno e os modelos anteriores esta nos momentos de obtenção da massa seca. Este modelo busca determinar a massa seca no n-éssimo dia após a emergência e no ponto de maturidade fisiológica, já os outros modelos vistos até aqui, utilizam como fator tempo dias ou semanas. (Observar a tabela 1.2)

$$Wr_i = \cos^q \left\{ \frac{\pi}{2} (1 - Dr_i) \right\} \quad (1.11)$$

Sendo que :

$$(q \in R / q > 1)$$

$$Wr_i = \frac{Wi}{Wm} \quad (1.12)$$

em que

$W_i$  e  $W_m$  referem às massas de matéria seca total, por unidade de área ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ), da parte aérea no  $i$ -ésimo dia após a emergência e no ponto de maturidade fisiológica, respectivamente, e  $q$  ao fator de forma da curva de crescimento.

**Tabela 1.2: Assunções para obtenção do modelo do co-seno**

Caso	Condição	Assunção
1	Se $D_r=0 \rightarrow W_r=0$	No instante da emergência ( $D_r=0$ ), não há acúmulo de
2	Se $D_r=0 \rightarrow (dW_r/dD_r)=0$	matéria seca da parte aérea ( $W_r=0$ ) e a taxa de acúmulo de matéria seca é desprezível ( $dW_r/dD_r=0$ )
3	Se $D_r=1 \rightarrow W_r=1$	No ponto de maturidade fisiológica ( $D_r=1$ ), o acúmulo de matéria seca é máximo ( $W_r=1$ ) e a taxa de acúmulo de matéria seca é nula ( $dW_r/dD_r=0$ )
4	Se $D_r=1 \rightarrow (dW_r/dD_r)=0^1$	Durante o ciclo da cultura ( $0 < D_r < 1$ ), a variação
5	Se $0 < D_r < 1 \rightarrow (d^2W_r/dD_r^2)=0^2$	temporal do acúmulo de matéria seca apresenta
6	Se $0 < D_r < 1 \quad (d^2W_r/dD_r^2)=0$ $\rightarrow (d^2W_r/dD_r^2) > 0$	comportamento senoidal. Existe, portanto, um único ponto de máxima taxa de acúmulo de matéria seca
7	Se $D_r((d^2W_r/dD_r^2)=0) < D_r < 1 \rightarrow$ $((d^2W_r/dD_r^2) < 0$	$(d^2W_r/dD_r^2)=0$

Sendo que tem-se como resolução para:

$$\frac{dWr}{dDr} = \frac{q\pi}{2} \cos^{(q-1)}(Y) \text{sen}(Y)$$

$$\frac{d^2Wr}{dDr^2} = \frac{q\pi^2}{4} [(q-1)\cos^{(q-1)}(Y)\text{sen}^2(Y) - \cos^q(Y)] \text{sen } dOY = \frac{\pi}{2} (1 - Dr)$$

Para estimativa do fator de forma (q), através de análise de regressão não linear, foi utilizado o método iterativo de Newton-Raphson:

$$q_{K+1} = q_k - \frac{\sum_{i=1}^n (Wr_i X_i^{q_1} \ln X_i) - \sum_{i=1}^n (X_i^{2q_1} \ln X_i)}{\sum_{i=1}^n (Wr X_i^{q_1} \ln^2 X_i) - 2 \sum_{i=1}^n (X_i^{2q_1} \ln^2 X_i)} \quad (1.13)$$

$$X_i = \cos \left\{ \frac{\pi}{2} (1 - Dr_i) \right\}$$

Utilizou-se o procedimento de anamorfose para calcular o valor inicial do fator de forma  $q_0$ :

$$q_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \ln(Wr_i + X_i)}{\sum_{i=1}^n \ln^2 X_i} \quad (1.14)$$

Para estimativa do desenvolvimento relativo da cultura referente à taxa máxima de acúmulo de matéria seca ( $Dr_a$ ) e ao florescimento ( $Dr_f$ ), foram derivadas as seguintes equações:

$$Dr_a = 1 - \frac{2}{\pi} \arctag \left( \frac{1}{\sqrt{q-1}} \right) \quad (1.15)$$

$$Dr_f = fDr_a (0 < f < 1)$$

sendo

$f$  é o fator empírico de conversão do desenvolvimento relativo referente à taxa máxima de acúmulo de matéria seca ao desenvolvimento relativo da cultura referente ao florescimento.

O modelo sugerido por Pimenta et al. (1999), mostrou-se eficaz para a simulação da variação temporal da massa seca da parte área da cultura e da massa seca de folhas do feijoeiro.

#### **1.2.4 Balanço entre Fotossíntese e Respiração**

Boote et al.(1989) utilizou parâmetros diferentes dos que já foram apresentados pelos outros modelos até aqui. Em seu modelo os coeficientes de peso diário das folhas, do pecíolo e da raiz, formará a equação do acúmulo de massa seca ( $\text{g/m}^2$ ) pela planta. Veja a equação:

$$\frac{dW}{dt} = \dot{W}^+ - S_L - S_R - S_S \quad (1.16)$$

em que

$\dot{W}^+$  taxa de crescimento de tecido da nova planta;

$S_L$  é a o peso de folhas;

$S_S$  é o peso de pecíolos;

$S_R$  é o peso das raízes.

Para obter-se  $\dot{W}^+$  resolve-se a equação:

$$\dot{W}^+ = E \cdot (P_g - R_m) \quad (1.17)$$

onde

E é a eficiência de conversão de  $CH_2O$  em massa seca;

$R_m$  é a manutenção da respiração;

$P_g$  é a função da fotossíntese.

Apesar de Boote et al.(1989) terem desenvolvido o modelo para prever o acúmulo de massa seca, os autores não comentam a respeito do mesmo ser utilizado para fins de pesquisa experimental.

Neste trabalho foi utilizado o modelo energético, pois ser um modelo matemático com base ecofisiológica e, portanto, mais facilmente generalizável e cujos dados de entrada estão disponíveis em estações agrometeorológica.

### ***1.3 MODELO MATEMÁTICO DE DISTRIBUIÇÃO DE BIOMASSA - PRINCÍPIOS E FATORES QUE AFETAM SEUS COEFICIENTES***

As plantas são constituídas, em grande parte por carboidratos, que são produzidos na assimilação de  $CO_2$ , estes que devem ser distribuídos, através da planta, de maneira sistemática. A distribuição é controlada pela demanda (de energia, crescimento ou diferenciação) e pelos mecanismos coordenadores. Há determinadas maneiras características pelas quais as plantas estabelecem seu orçamento de fotossintatos, dependendo do seu nível de organização e sua morfologia. Essas diferenças são evidentes nas substâncias produzidas e na taxa de crescimento,

as quais determinam o poder de competição, variando de acordo com as condições específicas do local (LARCHER, 1986).

Os produtos da assimilação de CO<sub>2</sub> são constantemente transferidos no interior de uma planta - das folhas e outros tecidos fotossintetizantes, para locais onde são consumidos ou estocados, e dos depósitos de armazenagem para zonas de crescimento, sementes e frutos. A translocação segue o gradiente de concentração que se estabelece entre o consumidor e a fonte - isto é, lugares em que a demanda é grande (centros de atração) e há síntese ou mobilização de fotossintatos. As folhas plenamente desenvolvidas suprem, preferencialmente, o consumidor com maior atração. Os produtos das folhas mais baixas são transferidos para o sistema radicular. O das partes mais elevadas da planta, para as zonas de crescimento dos rebentos e, especialmente, para as flores e frutos em maturação (LARCHER, 1986).

Primeiramente usa-se a maior porção de fotossintatos para a formação das folhas. Estas, então, participam na produção de massa seca e aumentam a absorção de nutrientes da planta. Enquanto esses órgãos fotossintetizantes vão se desenvolvendo, a massa das partes que apenas respiram permanece pequena, o que melhora o balanço geral. Na fase de floração, os sistemas de distribuição passam a favorecer os órgãos reprodutores. Estes recebem uma cota tão grande que todas as outras partes da planta são supridas com pouco mais que o necessário para se manter - as folhas mais velhas chegam mesmo a secar. Assim, no curso do ciclo de vida, as proporções de folhas, estruturas axiais, raízes e órgãos reprodutores de uma planta mudam consideravelmente. A maior mudança ocorre na fração de massa total, representada pelas folhas (LARCHER, 1986).

De acordo com Larcher (1986), o conhecimento dos mecanismos fisiológicos que regulam

$$\frac{dW_R}{dt} = X_R \dot{W}^+ - \dot{S}_R - \dot{M}_R \quad (1.20)$$

$$\frac{dW_{SH}}{dt} = X_{SH} \dot{W}^+ - \dot{M}_{SH} \quad (1.21)$$

$$\frac{dW_{SD}}{dt} = X_{SD} \dot{W}^+ + \gamma(\dot{M}_{SH} + \dot{M}_L + \dot{M}_S + \dot{M}_R) \quad (1.22)$$

onde

$X_L \dot{W}^+, X_S \dot{W}^+, X_R \dot{W}^+, X_{SH} \dot{W}^+, X_{SD} \dot{W}^+$  são coeficientes da partição da massa seca, os quais dependem do estágio fenológico de desenvolvimento; os termos  $\dot{S}_L, \dot{S}_S, \dot{S}_R$  descrevem a taxa diária de remoção de folhas, caule e raiz, respectivamente; os termos  $\dot{M}_L, \dot{M}_S, \dot{M}_R, \dot{M}_{SH}$  expressam a mobilização diária de proteínas nas folhas, caule, raiz e vagens, respectivamente;  $\gamma$  é a parcela do que está sendo realocado para aumentar o peso dos grãos.

## 2 O MODELO MATEMÁTICO

Neste capítulo são apresentadas às equações que descrevem o modelo matemático de simulação da produção potencial da soja, tendo como parâmetros de entrada do modelo as condições meteorológicas de radiação solar e temperaturas médias diárias e o fotoperíodo, parâmetro este que varia de forma previsível de acordo com a latitude do local. O problema central desta dissertação é a calibração do modelo matemático do desenvolvimento de populações



de soja, do acúmulo de massa seca pela parte aérea da cultura e partição desta em folhas, caule e frutos (vagem).

No âmbito da produção vegetal o efeito de alterações no crescimento e desenvolvimento da planta, provocadas por alterações nas condições ambientais, é simulado e os resultados avaliados sem à necessidade de realização de experimentos em cada meio estudado. O modelo a ser utilizado neste trabalho é baseado em relações ecofisiológicas e calibrado a partir de resultados experimentais e referências bibliográficas, em que foram acompanhados: as condições meteorológicas, o desenvolvimento da cultura, a evolução do acúmulo e partição da matéria seca aérea e o desenvolvimento da cultura.

O modelo matemático é formado por um modelo base no qual é estimado a massa seca acumulada pela parte aérea da cultura a partir da radiação fotossinteticamente ativa interceptada pela cultura e conhecido como modelo energético e por um submodelo acoplado a este para estimar a distribuição desta massa seca nas diferentes partes da planta a partir da estimativa do desenvolvimento da cultura.

## ***2.1 MODELO ENERGÉTICO***

Para estimar o acúmulo de matéria seca pela cultura da soja é preciso resolver um conjunto de equações, as quais fazem parte do modelo energético. Modelos energéticos são modelos que utilizam o conceito de rendimento energético e relacionam a radiação solar incidente com o acúmulo de matéria seca da parte aérea para estimar a eficiência de acúmulo de fotoassimilados (MÜLLER, 2001).

Um dos modelos energéticos mais utilizados por vários autores e que propõem uma relação entre a radiação solar interceptada por uma cobertura vegetal com a matéria seca acumulada pela parte aérea da planta para a determinação da produção potencial de uma cultura foi descrito por Gosse et al (1986).

Neste trabalho será utilizado o modelo energético, pois se considera que o mesmo possa trazer respostas qualitativas para o que se propõe durante o processo de modelagem. Sendo que

este modelo é constituído por uma base matemática simples, que usa parâmetros que podem ser estimados ou coletados de forma eficaz, aumentando assim a exatidão de suas estimativas.

No processo de produção de massa seca dois parâmetros biológicos serão decisivos, são eles: eficiência de absorção da radiação fotossinteticamente ativa incidente e eficiência de uso desta radiação na produção de massa seca. A eficiência de absorção depende entre outros fatores da idade da planta, da arquitetura foliar e do espaçamento entre elas e a eficiência de uso terá como fator determinante o estágio de desenvolvimento em que a planta está e a elevação na temperatura ambiente. A eficiência de absorção incorpora a eficiência de interceptação, considerando que a RFA interceptada que é absorvida pela planta, se mantém constante durante todo o ciclo.

A eficiência de uso da radiação fotossinteticamente ativa interceptada ou absorvida como já foi comentado, também é um dos fatores determinantes no processo de produção de massa seca por uma população de plantas. Este parâmetro expressa a capacidade que uma planta ou população de plantas possuem em transformar a radiação fotossinteticamente ativa interceptada ou absorvida em matéria seca aérea acumulada, representando o uso da radiação fotossinteticamente ativa no processo fotossintético e no transporte de fotoassimilados para as regiões de crescimento e armazenamento.

Essas relações existentes entre a quantidade de radiação interceptada por uma cultura e sua produção de matéria seca tem se mostrado um método simples e eficaz para a determinação da produtividade de culturas sob diferentes condições ambientais (MONTHEITH, 1977; MUCHOW et al., 1993; COSTA et al., 1999). Partindo do princípio de que o ambiente pode afetar os mecanismos da planta envolvidos na captura e utilização da radiação, ARKEBAUER et al., (1992) afirmam que a eficiência de uso da radiação fotossinteticamente ativa (EUR) varia de acordo com as condições ambientais. Já outros autores mencionam que a EUR varia de acordo com a temperatura (HUNT, 1982), com a radiação (RUSSEL et al., 1989), com o déficit de pressão de vapor (SQUIRE, et al., 1984), com o efeito do estágio de desenvolvimento em que a planta se encontra e com o estresse hídrico (COSTA et al., 1999). A EUR é um parâmetro obtido através da razão entre a biomassa produzida e a quantidade de radiação interceptada. A equação de estimativa da eficiência de uso da radiação fotossinteticamente ativa interceptada é:

$$EUR = \frac{MSacum}{RFA\text{int}} \quad (1.24)$$

onde

$EUR$  é a eficiência de uso da radiação fotossinteticamente ativa interceptada ( $\text{MJ.m}^{-2}$ );

$MSacum$  é o peso da massa seca acumulada pela parte área da cultura durante o ciclo da cultura ( $\text{kg.ha}^{-1}$ );

$RFA\text{int}$  é a radiação fotossinteticamente ativa interceptada pela cultura ( $\text{MJ.m}^{-2}$ )

A quantidade de radiação solar retida (interceptada ou absorvida) no dossel é dependente de vários fatores físicos e biológicos, como a posição solar, geometria, tamanho, anatomia e idade da folha, arranjo e estrutura da plantas (Pereira et al. 1982). Já a radiação fotossinteticamente ativa incidente ( $RFA\text{inc}$ ) sobre uma população de plantas é determinado pelo produto entre o coeficiente que expressa a fração de RFA em Rg ( $\alpha$ ) e a radiação solar global ( $Rg$ ), sendo que do fluxo desta radiação sobre uma cultura apenas uma pequena parte é absorvida pelos cloroplastos e utilizada no processo fotossintético. Por isso, a importância dos modelos estudarem a quantidade e distribuição desse fluxo no interior da planta, pois ele está diretamente relacionado à produção de massa seca e, conseqüentemente, à capacidade produtiva da cultura. A  $RFA\text{int}$  foi determinada no modelo pela equação:

$$RFA\text{int} = \alpha \cdot Rg \cdot E\text{int} \quad (1.25)$$

onde

$\alpha$  é o coeficiente que exprime a fração de radiação fotossinteticamente ativa em radiação global;

$Rg$  é a radiação global obtida diariamente ( $\text{MJ.dia}^{-1}$ );

$E_{int}$  é a eficiência de interceptação da radiação fotossinteticamente ativa.

França (1997) diz que o aproveitamento da radiação solar incidente pelas culturas está associado ao IAF e outros parâmetros físicos, biológicos e geométricos que determinam a transmissão, interceptação e absorção de radiação fotossinteticamente ativa (RFA).

Os modelos energéticos são ajustados a partir da quantificação da parcela visível da radiação solar incidente, aumentando a precisão das estimativas pelos modelos de potenciais produtivos. A fração de RFA na  $R_g$  ( $\alpha$ ) representa a parcela visível de radiação solar incidente na cultura, é utilizada na quantificação da radiação fotossinteticamente ativa incidente (RFA<sub>inc</sub>) (1.28) e terá variações de um local para outro e até mesmo entre estações do ano, pois depende da umidade do ar, latitude, longitude, inclinação do sol, altitude e do tipo de cobertura do céu. Para as condições da Depressão Central do Rio Grande do Sul França et al.(1997) encontraram 0,42, valor este utilizado neste trabalho.

Para a estimativa da eficiência de interceptação da radiação fotossinteticamente ativa ( $E_{int}$ ), parâmetro este que estima a capacidade que a população de plantas possui em interceptar a radiação fotossinteticamente ativa incidente (RFA<sub>inc</sub>), sendo dependente da superfície de captação de radiação na população vegetal (área foliar) e da forma e ângulo com que esta superfície é distribuída no dossel de folhas, foi utilizado a seguinte equação:

$$E_{int} = 1 - e^{-K \cdot IAF} \quad (1.26)$$

em que

$E_{int}$  é a eficiência de interceptação da radiação fotossinteticamente ativa incidente pela cultura;

$K$  é coeficiente de extinção da cultura;

$IAF$  é o índice de área foliar.

Marchesan (2005), utilizando os dados experimentais coletados no ano agrícola de 2004/05, estimou a  $E_{int}$  através da equação (1.27), sendo possível a determinação do coeficiente de extinção. Veja a equação:

$$E_{int} = \frac{RFA_{int}}{RFA_{inc}} \quad (1.27)$$

sendo

$E_{int}$  é a de interceptação da ( $RFA_{inc}$ );

$RFA_{int}$  é a radiação fotossinteticamente ativa interceptada pela cultura ( $MJ.m^{-2}$ );

$RFA_{inc}$  é a radiação fotossinteticamente ativa incidente pela cultura ( $MJ.m^{-2}$ ).

A eficiência na interceptação da radiação fotossinteticamente ativa ( $E_{int}$ ) está diretamente relacionada com o IAF e com o coeficiente de extinção da cultura. Estes fatores influem na taxa de desenvolvimento da área foliar, na duração da área foliar, e no potencial de produção de massa seca. Com os dados experimentais de 2004/05 foi encontrado como coeficiente de extinção através da regressão linear entre o índice de área foliar e o termo  $[\ln(1 - E_{int})]$ , o valor de 0,52, este foi utilizado na determinação dos parâmetros necessários para o ajuste do modelo matemático.

Neste trabalho foram utilizados os dados de  $RFA_{inc}$  (radiação fotossinteticamente ativa incidente pela cultura) e da  $RFA_{t}$  (radiação fotossinteticamente ativa transmitida pelo dossel de plantas até a nível do solo e refletida pelo solo) estes medidos através da instalação de barras de silício no experimento do ano agrícola de 2004/2005. Com estes valores foi calculada a parcela da radiação fotossinteticamente ativa interceptada pela cultura ( $RFA_{int}$ ) pela fórmula:

$$RFA_{int} = RFA_{inc} - RFA_{t} \quad (1.28)$$

onde

$RFA_{int}$  é a radiação fotossinteticamente ativa interceptada pela cultura ( $MJ.m^{-2}$ );

$RFA_{inc}$  é a radiação fotossinteticamente ativa incidente na cultura ( $MJ.m^{-2}$ );

$RFA_t$  é a radiação fotossinteticamente ativa transmitida pela cultura ( $MJ.m^{-2}$ ).

Os valores obtidos para a eficiência de interceptação da RFA ( $E_{int}$ ) na equação (1.27) foram relacionados com a evolução do índice de área foliar ( $IAF$ ) para prever o coeficiente de extinção da população de plantas. Esta estimativa foi efetuada pelo ajuste do coeficiente angular  $b$  da equação seguinte:

$$\ln(1-E_{int}) = -b \cdot IAF \quad (1.29)$$

em que

$b$  é o coeficiente angular da equação (inclinação da reta), que estima o coeficiente de extinção  $K$  e o  $IAF$  índice de área foliar em função dos graus-dia acumulados.

O coeficiente de extinção representa numericamente a relação entre a área de sombra projetada em uma superfície horizontal e a área de folha que a produz, sendo que os valores médios diários serão estáveis para espécies que apresentarem homogeneidade de tamanho, distribuição e ângulo de inclinação das folhas. Durante o período diurno ocorrem variações no valor do coeficiente de extinção em decorrência da modificação do ângulo de incidência da radiação solar. Conforme Costa et al.(1997), o estudo do coeficiente de extinção ( $K$ ) juntamente com o  $IAF$  fornece indicações sobre a eficiência das plantas em interceptar a radiação.

O  $IAF$  foi definido por Watson (1947) como sendo a relação entre a área foliar e a área de solo ocupada pela mesma. A capacidade fotossintética de uma planta depende da interceptação da radiação solar, que por sua vez esta relacionada com o  $IAF$ . O aumento do  $IAF$  eleva o nível de interceptação da luz incidente, proporcionando um aumento de produção de biomassa. Esta produção de biomassa aumenta até um valor de “ $IAF$  crítico”, este definido como a quantidade de

área foliar requerida para a interceptação de 95% da radiação solar ao meio dia. Atingindo-se o “IAF crítico” acontecerá o auto-sombreamento das folhas, fazendo com que a taxa fotossintética média por unidade de área decresça, podendo causar redução na produtividade devido ao desvio de fotoassimilados de outras folhas para a respiração da massa foliar excedente.

No entanto, o valor do IAF varia de acordo com o clima, o estágio de desenvolvimento da planta e a estação do ano, sendo maior para maiores intensidades luminosas e quando a proporção de radiação direta na radiação incidente aumenta, além de ser dependente da arquitetura e composição botânica/morfológica da planta (FRANCISCO, 2002).

Câmara & Heffig (2000) afirmam que as cultivares de soja em uso no Brasil produzem muito mais superfície foliar do que o necessário para a taxa de fotossíntese máxima, atingindo IAF entre 5 a 8, durante os estádios R4 e R5. Como a maioria da luz incidente é capturada pela periferia do dossel vegetativo, geralmente, as folhas mais baixas da planta contribuem pouco para a produção de fotoassimilados. O IAF crítico ou ótimo para a soja interceptar 95% da radiação incidente está entre 3 e 3,9 (MUCHOW, 1985; MAYERS et al.,1991), dependendo da cultivar e do arranjo espacial.

Para Brisson et al. (1990) o submodelo do IAF é linear segmentado, constituído por uma estrutura matemática simples e apropriado para descrever a evolução do IAF de uma população de plantas, durante os períodos em que a área foliar possui uma importância para a cultura, ou seja, a fase de maior fotossíntese. Este submodelo determina seus resultados em função dos graus-dia, conseguindo uma precisão considerável em suas estimativas, pois a variável de entrada é a temperatura média diária após a emergência.

A cultura da soja tem inicialmente um crescimento lento do seu IAF, aumentando exponencialmente. Em seguida acontece um aumento linear até o início do florescimento, sendo que este processo só se dá com o acúmulo de determinado graus-dia, ou seja, a instalação da cultura depende do acúmulo dos graus-dia. Com o início da formação de vagens em R1 acontece um crescimento do índice área foliar não tão acentuado, em que seus valores vão aumentando gradativamente, pois a planta começa a utilizar os seus fotoassimilados para a formação de seus novos componentes de rendimento. Os valores de IAF no início da formação de grãos em R5 tende a se estabilizar ou manter-se constante até o começo da maturação fisiológica da planta no

estádio reprodutivo R7, momento este em que a rápida senescência ocasionará um decréscimo rápido nos valores de IAF.

O IAF utilizado na equação (1.26) foi obtido através da coleta de dados experimentais no ano agrícola de 2004/05 e 2005/06. A equação a seguir foi utilizada para a obtenção do IAF:

$$IAF = \frac{AFam}{S} \quad (1.30)$$

onde

$IAF$  é o índice de área foliar;

$AFam$  é a área foliar da amostra ( $cm^2$ );

$S$  é a área do terreno ocupado pela amostra ( $4000cm^2$ ).

Para o cálculo da área foliar da amostra de plantas, utilizou-se uma relação entre área foliar específica ( $AFesp$ ) e o peso da  $MS$  da amostra, ficando assim expressa pela equação:

$$AFam = MSam \cdot AFesp \quad (1.31)$$

onde

$AFam$  é a área foliar da amostra ( $cm^2$ );

$MSam$  é o peso da massa seca área da amostra ( $kg$ );

$AFesp$  é a área foliar específica ( $cm^2.kg^{-1}$ ).

Já a  $AFesp$  foi obtida pela fórmula:



$$AF_{esp} = \frac{AF_{foto}}{MS_{foto}} \quad (1.32)$$

sendo

$AF_{esp}$  é a área foliar específica ( $cm^2 \cdot kg^{-1}$ );

$AF_{foto}$  é a área foliar da foto ( $cm^2$ );

$MS_{foto}$  é o peso da massa seca da foto ( $kg$ ).

Os valores encontrados para IAF através da equação (1.30) para os estádios fenológicos V6, R1, R5 e R7 em cada uma das épocas de semeadura nos dois anos agrícolas foram comparados com os calculados a partir da equação (1.33) em que traz o IAF em função dos graus-dia ou acumulados e do índice de dias fototermais ou da taxa de desenvolvimento da soja, com a finalidade de verificar a eficácia do submodelo de IAF. Veja as equações que determinam o IAF em um dia determinado ou acumulado:

$$IAF_i = GD_i \cdot c \cdot a_n \quad (1.33)$$

$$a_n = \sum_{i=1}^n R(i) \quad (1.34)$$

onde

$IAF_i$  é o acúmulo de IAF no i-ésimo;

$i$  é o dia do período considerado;

$n$  é o período considerado de velocidade de instalação do índice de área foliar constante;

$GD$  são os graus-dia no  $i$ -ésimo dia ( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{dia}^{-1}$ );

$c$  é a máxima velocidade de instalação da cultura;

$a_n$  é o coeficiente para o  $n$ -ésimo dia do período;

$R(i)$  é o índice de dias fototermais no  $i$ -ésimo dia.

Desta forma a velocidade de instalação do índice de área foliar é definida pela quantidade de GD disponível por dia e pelo estágio fenológico em que a planta se encontra e que definirá o valor do coeficiente  $a$ .

De acordo com Pereira et al. (2002) o conceito de graus-dia (GD) baseia-se no fato de que o desenvolvimento de uma planta está relacionado com a temperatura do meio, e o seu acúmulo expressa a quantidade de energia que uma espécie necessita para atingir um certo grau de maturidade. A definição de graus-dia traz a existência de temperaturas basais (inferior,  $T_b$ ; e superior,  $T_B$ ), além das quais a planta não se desenvolve.

Cada variedade de plantas possui suas temperaturas basais, as quais podem variar ainda de acordo com sua idade ou fase fenológica, em que tanto as temperatura noturnas ou diurnas são consideradas igualmente importantes para o seu desenvolvimento vegetal. Neste trabalho a temperatura basal inferior ( $T_b$ ) da soja foi considerada como sendo de  $14^{\circ}\text{C}$ , de acordo com Pereira et al. (2002).

Na soja, a temperatura age sobre os processos de germinação, crescimento, floração, frutificação, nas reações químicas da respiração e da fotossíntese e, ainda, na absorção de água e nutrientes. Dessa formas, a temperatura é uma das variáveis meteorológicas mais importantes, afetando não apenas o acúmulo de massa seca como, também, a duração dos vários estádios de desenvolvimento da espécie, uma vez que, a planta necessita um determinado acúmulo térmico para completar cada subperíodo de desenvolvimento. Conforme Schöffel (2002) os graus-dia é considerado como um dos índices biometeorológico mais utilizado para relacionar o grau de desenvolvimento de uma cultura com a temperatura ambiente.

O crescimento vegetativo é pequeno, ou nulo, em temperaturas menores ou iguais a  $10^{\circ}\text{C}$ . Temperaturas acima de  $40^{\circ}\text{C}$  terão efeito adverso na taxa de crescimento, provocando

danos na floração e diminuição da capacidade de retenção dos legumes (Embrapa, 1998). O florescimento atrasa quando a temperatura permanece inferior a 23°C (Mota, 1993), e não ocorre sob temperaturas inferiores a 13°C (Miranda et al., 1981) (Embrapa, 1998). Em temperaturas baixas no período de maturação da soja, associadas à alta umidade, podem provocar atraso na data de colheita, bem como na ocorrência de retenção foliar (Embrapa, 1998).

A estimativa dos graus-dia após a emergência foi feita a partir da equação:

$$GD_i = \left( \frac{Tmáx_i + Tmín_i}{2} \right) - Tb \quad (1.35)$$

sendo

$GD_i$  é o valor diário dos graus-dia ( $^{\circ}\text{C} \cdot \text{dia}^{-1}$ );

$Tmáx_i$  é a temperatura máxima registrada no dia  $i$  ( $^{\circ}\text{C}$ );

$Tmín_i$  é a temperatura mínima registrada no dia  $i$  ( $^{\circ}\text{C}$ );

$Tb$  é a temperatura basal da soja, de 14°C.

Já o cálculo do acúmulo de graus-dia ( $^{\circ}\text{C} \cdot \text{dia}^{-1}$ ) é realizado através da soma de temperaturas efetiva, conforme a equação:

$$GDA = \sum_{i=1}^n GD_i \quad (1.36)$$

onde

$GDA$  é o total de graus-dia acumulados ao longo da fase ou ciclo;

$n$  é o número de dias da fase ou ciclo ou o número de dias até a maturação fisiológica;

$T_i$  é a temperatura média do ar no dia  $i$  (°C);

A equação (1.37) nos possibilita o calculo da temperatura média diária do ar:

$$\bar{T}_i = \frac{(T_{máx_i} + T_{mín_i})}{2} \quad (1.37)$$

A constante fototérmica ( $CFT$ ), apresentada na equação (1.38), nos mostra o momento em que a soja atinge outro estágio fenológico, sendo expressa pelo somatório do índice de dias fototermais ou pela taxa de desenvolvimento no dia  $i$  ao longo do ciclo da cultura ( $n$ ):

$$CFT = \sum_{i=1}^n R(i) \quad (1.38)$$

O índice de dias fototermais ou a taxa de desenvolvimento da soja  $R(i)$  no estágio reprodutivo (entre emergência e floração) é estimado a partir da relação entre fotoperíodo e a temperatura do ar, pois estes são importantes para o seu desenvolvimento, por provocarem mudanças qualitativas ao longo do seu ciclo. Já no estágio vegetativo o desenvolvimento da soja só será influenciado pela temperatura do ar. A seguir, a equação utilizada para a determinação da  $R(i)$  a partir do estágio reprodutivo:

$$R(i) = Fr(T) \cdot F(N) \quad (1.39)$$

onde

$R(i)$  é o índice de dias fototermais no dia  $i$ ;

$Fr(T)$  é a função da temperatura;

$F(N)$  é a função do comprimento do dia.

A função da temperatura é expressa pela fórmula:

$$Fr(T) = \frac{(\bar{T}_i - Tmín)}{(Tot - Tmín)} \quad (1.40)$$

onde

$Fr(T)$  é função da temperatura;

$\bar{T}_i$  é a temperatura média diária no i-ésimo dia (°C);

$Tmín$  é a temperatura mínima diária, segundo Boote (1993) como sendo 6°C;

$Tot$  é a temperatura ótima diária, segundo Boote et al. (1993) como sendo 30°C;

A função do comprimento do dia ou do fotoperíodo foi obtida através da equação:

$$F(N) = \frac{(ES_i - Nmín)}{(Not - Nmín)} \quad (1.41)$$

sendo

$F(N)$  é a função do comprimento do dia ou do fotoperíodo;

$ES_i$  é a escotofase no i-ésimo dia (h);

$Nmín$  é o comprimento mínimo da noite (h), de acordo com Boote et al.(1991) assume o valor de 5h;

$Not$  é o comprimento ótimo da noite (h), sendo determinado para este trabalho o valor de 18,8h.

A escotofase (ES) ou capacidade que um organismo tem em detectar o comprimento da noite, foi obtida através da equação:

$$ES_i = 24 - Fp_i \quad (1.42)$$

onde

24 é o coeficiente que expressa a duração do dia em horas;

$Fp_i$  é o fotoperíodo no  $i$ -ésimo dia (h).

O fotoperíodo (Fp) é a resposta fisiológica da planta a uma modificação nas proporções de luz e escuridão num ciclo diário de 24 horas. É o fator mais importante na determinação da proporção relativa entre os períodos vegetativo e reprodutivo da soja, influenciando, também, o período de florescimento até a formação da vagem e, daí, até à maturação, ao número de nós e à altura da planta. O fotoperíodo no  $i$ -ésimo dia é determinado pela equação a seguir:

$$Fp_i = \frac{(Hp_i \cdot 2)}{15} \quad (1.43)$$

Em que o  $Hp_i$  é o ângulo do pôr do sol (graus e décimos) no dia  $i$  e foi calculado pela equação:

$$Hp_i = \arccos(-\operatorname{tg} \gamma \cdot \operatorname{tg} \sigma_i) \quad (1.44)$$

onde

$\gamma$  é latitude da região noroeste do estado que tem como valor  $-28^\circ$ ;

$\sigma_i$  é o declínio do sol (graus e décimos) no  $i$ -ésimo dia.

O declínio do sol ( $\sigma$ ) foi calculado pela fórmula:

$$\sigma_i = 23,45 \cdot \text{sen} \left[ \frac{360}{365} \cdot (284 + Dj) \right] \quad (1.45)$$

onde

$Dj$  é o dia Juliano (número de ordem a partir de 1° de janeiro).

### ***2.1.1 Submodelo de Distribuição de Massa Seca pela parte área da cultura***

Os modelos energéticos atuam como submodelos para a simulação do rendimento da cultura da soja, agregando modelos para a simulação da matéria seca acumulada nas diferentes partes do vegetal, durante o seu ciclo de vida, assim permitindo também à estimativa do rendimento de grãos.

De acordo com Health et al. (1985), o rendimento alcançado por uma cultura é determinado, principalmente, pela oferta sazonal de energia solar cuja utilização é condicionada por elementos, como umidade do solo e temperatura do ar. A radiação solar é praticamente a única fonte de energia para os processos fisiológicos e bioquímicos que ocorrem nos vegetais. Sendo assim, a produção final de matéria seca de uma planta depende, em última instância, da eficiência com que as folhas convertem energia radiante em energia química através da fotossíntese (ASSIS & MENDEZ, 1989).

A produtividade de uma cultura é definida pela interação entre a planta, o ambiente de produção e o manejo. Altos rendimentos só são obtidos quando as condições ambientais são favoráveis em todos os estádios de crescimento da soja. Porém, para se obter altos rendimentos é

necessário conhecer práticas culturais compatíveis com produção econômica, aplicadas para maximizar a taxa de acúmulo de matéria seca no grão. As principais práticas de manejo que devem ser consideradas são: semeadura na época recomendada para a região de produção; escolha dos cultivares mais adaptados a essa região; uso de espaçamentos e densidades adequados a esses cultivares; monitoramento e controle das plantas daninhas, pragas e doenças e redução ao mínimo das possíveis perdas de colheita (Ritchie et al., 1994).

Nenhuma prática cultural isolada é mais importante para a soja do que a época de semeadura, sendo a variável que produz maior impacto sobre a produção da cultura. A melhor época de semeadura para a soja depende, principalmente, da temperatura do solo para a germinação, da temperatura do ar durante todo o ciclo da planta, do fotoperíodo após a emergência e da umidade do solo na semeadura, floração, maturação e na colheita (Barni & Bergamaschi, 1981).

Para as condições brasileiras, a época de semeadura da cultura da soja varia em função do cultivar, região de cultivo e condições climáticas do ano agrícola, geralmente apresentando como faixa de recomendação o período de outubro à dezembro (Nakagawa et al., 1983). De acordo com estes autores, o mês de novembro tem proporcionado os melhores resultados nos estados que cultivam mais tradicionalmente esta cultura.

A época de semeadura provoca alterações nos componentes da produção e nas características agronômicas da soja, como altura de planta, altura de inserção da primeira vagem, número de ramificações e diâmetro do caule (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA, 1996).

Para determinar o rendimento de grãos, através do modelo energético, o índice de colheita ( $I_c$ ) foi estimado, para época de plantio e ano, seguindo a equação:

$$I_c = \frac{MS_{gr}}{MS_{acum}} \quad (1.46)$$

onde



*I<sub>c</sub>* é o índice de colheita;

*MS<sub>gr</sub>* é o peso da massa seca de grãos (kg/ha);

*MS<sub>acum</sub>* é o peso da massa seca acumulada pela parte área da cultura durante o ciclo da cultura (kg/ha).

O índice de colheita estima a produtividade final da cultivar, e é um parâmetro que varia de acordo com o genótipo do material, com as condições do meio e das interações entre estes dois.

A determinação do submodelo de distribuição da massa seca acumulada pela parte área da cultura nos componentes folha, caule e vagem, foi feito para cada subperíodo avaliado neste trabalho (V6 até R1, R1 até R5 e R5 até R7) a partir de dados empíricos, levando-se em consideração as relações estabelecidas entre a formação destes componentes e os valores de massa seca total e RFA<sub>inc</sub>.

### **3 MATERIAL E MÉTODOS**

Os experimentos foram conduzidos em dois anos agrícolas. No primeiro ano pelos alunos de agronomia Cleriston Fidelis Marchesan e Tiago Mello Margutti e no segundo ano agrícola pelos alunos Tiago Mello Margutti, Bruno Lauratti e Juliano Fiorin.

#### ***3.1 Local, clima e solo***

Os experimentos foram conduzidos a campo durante os anos agrícolas de 2004/05, e 2005/06, sendo instalados no Instituto Regional de desenvolvimento Rural – IRDeR, localizado no município de Augusto Pestana, no Estado do Rio Grande do Sul, tendo como coordenadas: 28° 27' 17" de latitude e 53°54' 50" de longitude, apresentando altitude aproximada de 448 m (ATLAS AGROCLIMÁTICO DO ESTADO DO RS-1989).

O clima da região é subtropical úmido de verão quente do tipo fundamental “cfa”, conforme a classificação climática de Köppen, sendo o clima predominante no estado do Rio Grande do Sul e na Região Sul do Brasil. Janeiro e fevereiro são os meses mais quentes, enquanto que junho e julho são os meses mais frios. A temperatura média nos meses mais quentes é superior a 22 °C e a dos meses mais frios é inferior a 18 °C e superior a 3 °C. A precipitação média anual é acima de 1600 mm (PEREIRA et al. 2002).

Os dados diários de radiação solar incidente (MJ/m<sup>2</sup>), precipitação (mm/dia), temperatura mínima (° C), temperatura máxima (° C), termômetro bulbo úmido 9 horas (° C), termômetro bulbo seco 15 horas (° C), termômetro bulbo seco 21 horas (° C), foram observados na estação agrometeorológica da FEPAGRO localizada no IRDeR (Instituto Regional de Desenvolvimento Rural) localizado na cidade de Augusto Pestana-RS.

Foram realizadas irrigações quando a última precipitação ou reposição fosse esgotada, considerando um consumo hídrico de 9 mm/dia, isto variando com as condições ambientais e com a data de semeadura que tivesse maior demanda hídrica naquele momento. Os dados de irrigação (mm/dia) foram obtidos com base na média de leituras de seis pluviômetros instalados na área experimental. Estimou-se a intensidade média de irrigação (mm/h), e após foi controlado o tempo de irrigação e estimado o total irrigado pela multiplicação de intensidade e o tempo de irrigação para cada data de irrigação.

O solo da área experimental é classificado como um Latossolo Vermelho Distroférico típico, com as seguintes características: solo profundo, coloração vermelha-escura, boa drenagem, textura argilosa com predominância de argilominerais 1:1 (EMBRAPA,1999).

### ***3.2 Delineamento Experimental e Tratamentos***

O delineamento experimental utilizado nos dois anos agrícolas foi o de blocos ao acaso com parcelas sub-divididas, com espaçamentos entre linhas de 40 cm. No ano agrícola de 2004/05 os tratamentos constaram de três datas de semeadura e no ano agrícola de 2005/06 os tratamentos tiveram quatro datas de semeaduras. Sendo que no primeiro ano agrícola tínhamos 63 amostras e no segundo ano 84 amostras.

A variedade utilizada nos dois anos agrícolas foi IAS 5. Conforme Costamilan (2004) essa cultivar apresenta como características: crescimento determinado, altura média de plantas para semeaduras em novembro 76 cm, teores de óleo 21,3% e de proteína na semente 41,5%, é resistente a pústula bacteriana, moderadamente ao crestamento bacteriano, no entanto suscetível a podridão da haste e a mancha olho-de-rã.

As parcelas foram constituídas de 7 linhas de plantio, espaçamento de 0,40 m entre linhas e 12 metros de comprimento. O espaçamento entre parcelas foi de 0,50 m e entre blocos foi de 1 metro. Para as amostragens foram consideradas as 5 linhas centrais com 1,5 m de comprimento, sendo as demais consideradas como bordadura.

### ***3.3 Condução do Experimento***

No primeiro ano agrícola a semeadura foi realizada nas seguintes datas: 19/11/04, 12/12/04 e 14/01/05 e no segundo ano agrícola em quatro: 12/12/05, 26/12/05, 13/01/06 e 31/01/06. Foram realizadas semeaduras em outubro e novembro no segundo ano agrícola, mas animais acabaram comendo as sementes, impossibilitando assim a realização das avaliações as quais este trabalho se propõe para datas antecipadas. O desbaste foi realizado 15 dias após a emergência das plantas, deixando as parcelas com a densidade de 300.000 plantas/ha.

Na semeadura foi realizado o tratamento químico das sementes. E após a secagem deste, efetuou-se a inoculação com *Bradyrhizobium japonicum* para aumentar a eficiência de absorção de nitrogênio atmosférico.

A adubação foi realizada de acordo com as recomendações técnicas de adubação e de calagem para os Estados do RS e SC (Comissão de fertilidade do solo-RS/SC, 2000), com base nos resultados da análise de solo. O controle de plantas foi efetuado através da capina manual. O controle de pragas como a lagarta da soja (*Anticarsia gemmatalis*) e percevejos (*Nezara viridula* e *Piezodorus guildinii*) ocorreu quando as populações dos mesmos se encontrarem próximos de atingir o nível de dano econômico.

### ***3.4 Determinações e Amostragens***

Acompanhou-se o desenvolvimento fenológico da soja em cada época de semeadura, seguindo-se a Escala Fenológica de Fehr & Caviness 1977 apud Neumaier et al., (2000) observando-se os estádios fenológicos em amostras constituídas de 10 plantas na linha obtida ao acaso por parcela.

Nos dois anos agrícolas as variáveis avaliadas foram: a identificação das datas nas quais ocorram as principais fases do desenvolvimento da cultura da soja, seguindo a escala fenológica de Feher & Caviness, o acúmulo de matéria seca total pela parte área da cultura, a partição da matéria seca e o índice de área foliar (IAF) sendo estimados em quatro momentos: no final do período de instalação da população vegetal (período de crescimento vegetativo V6); no início do florescimento (R1); quando for atingido o final do período de abortamento de grãos (R5); no início da rápida senescência (R7) e a análise dos componentes do rendimento ( $n^{\circ}$  nós/  $m^2$ ;  $n^{\circ}$  vagens/  $m^2$ ;  $n^{\circ}$  grãos/ $m^2$ ; peso de 100 grão (g); rendimento (kg/ha)) por ocasião da colheita.

### ***3.5 Estimativa dos Coeficientes para a Modelagem***

Foram realizadas a estimativa de alguns coeficientes importantes e decisivos para a eficácia do modelo, como: o valor da eficiência de uso da radiação fotossinteticamente ativa, a definição de quantos graus-dia foi necessário para a instalação da cultura em cada ano agrícola, qual o acúmulo de dias fototermais da VE até R1, VE até R5 e VE até R7, qual a relação entre IAF e GD e o valor do fotoperíodo ótimo.

A eficiência de uso da radiação fotossinteticamente ativa (EUR) da equação (1.24) foi obtida através dos dados de massa seca acumulada pela parte área da cultura no estádio fenológico R7 de cada época de semeadura e os de radiação fotossinteticamente ativa incidente (RFAinc) estimados pelo modelo até R7. Foi realizado para cada um dos sete ambientes

estudados o cálculo da EUR, a partir do quociente entre massa seca acumulada em R7 e o somatório da RFAinc acumulada até R7, sendo que foi desconsiderado neste cálculo os valores de massa seca acumulada e a RFAinc, para quando o IAF é igual a 1, com valores obtidos foi realizado a média aritmética, para a determinação da EUR.

Durante a 1ª fase a planta recebe nutrientes da semente e inicia a produção de fotoassimilados logo após a emergência das primeiras folhas. A separação destes dois processos não será feita neste trabalho, sendo iniciado a modelagem quando o IAF for igual a um. Para tanto foi identificado quando isto ocorre (graus-dia) e qual o acúmulo de massa seca ocorrido. Para a determinação da velocidade de instalação do índice de área foliar foram considerados os subperíodos: V6 até R1, R1 até R5 e R5 até R7. No subperíodo de V6 até R1, período este de rápido crescimento foliar, o parâmetro ( $a_n$ ) utilizado na equação (1.33) foi considerado como sendo 1, no segundo subperíodo (R1 até R5) foi encontrado 0,342466 e no subperíodo de R5 até R7 o valor assumido por este coeficiente foi zero, pois o crescimento foliar nesta fase é constante. Para o subperíodo de R1 até R5 o  $a_n$  foi definido a partir do quociente entre 0,005 e 0,0146. Estes valores representam a média aritmética da relação entre IAF e graus-dia, relação está obtida a partir do quociente entre a diferença entre o IAF e graus-dia nos subperíodos de V6 até R1 e de R1 até R5 para cada época de plantio dos dois anos agrícolas (2004/05 e 2005/06) estudos neste trabalho.

Os graus-dia acumulados necessários para a instalação da cultura foram determinados para cada ano agrícola através de uma regressão linear da relação entre graus-dias acumulados e IAF observado no subperíodo VE até V6. Com a definição da equação linear para cada ano agrícola, a partir do ajuste realizado, foi considerado o IAF máximo neste período como sendo 1, e partindo disto foi determinado a soma térmica.

Para a determinação do acúmulo de dias fototermais ou a taxa de desenvolvimento nos períodos de VE-R1, VE-R5 e VE-R7, primeiramente foi estimado o fotoperíodo crítico ou ótimo, sendo que aquele que produziu menor desvio padrão na estimativa da constante térmica para os sete ambientes analisados. Para tanto foram considerados como fotoperíodo ótimo ou crítico valores entre 12h e 16,5h, isto para cada um dos sete ambientes estudado. Os resultados encontrados foram submetidos a uma análise de regressão entre fotoperíodo e desvio padrão, e definição o ponto de mínimo para cada época de plantio, nos períodos considerados acima. E

através da comparação entre os pontos de mínimo encontrados, chegou-se até o fotoperíodo ótimo ou crítico. Com este valor encontrado foi calculado o acúmulo de dias fototermais ou a

C, até atingirem peso constante. Depois foram pesadas, permitindo a determinação da matéria seca de caule, folhas, folhas senescentes, vagens e a matéria seca total.

A elaboração do submodelo de distribuição da massa seca acumulada pela parte área da cultura, foi realizada através da determinação dos coeficientes para cada subperíodo e componente (folhas, caule e vagem). Até R1 foi baseada na relação entre o peso da massa seca de caule e o peso da massa seca de folhas, em que para os setes ambientes estudados esta relação apresenta-se constante. Já a partir de R1 até R5 foi feito através do ajuste linear entre a peso da massa seca total e o peso da massa seca de cada componente. Entre R1-R7 os parâmetros levados em conta na estimativa à massa seca total acumulada até R1 (considera-se que um maior crescimento vegetativo influenciará na formação de vagens) e a diferença da RFA<sub>inc</sub> entre R1 e R5 e entre R1 e R7, com estes dados foi realizada uma regressão múltipla e definição da equação para obtenção da distribuição da massa de seca de vagens.

#### **4 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Neste capítulo serão apresentados os resultados da modelagem matemática do desenvolvimento e acúmulo de massa seca em populações de soja, como também de algumas simulações utilizando épocas de semeadura antecipadas em relação às realizadas nos experimentos. Também foram realizadas simulações de outros anos agrícolas, objetivando verificar se com o uso do modelo são produzidas estimativas dentro de limites esperados e, conseqüentemente, se os coeficientes estimados possam ser utilizados para o local independentemente da data de semeadura estar entre as utilizadas nos experimentos.

**Tabela 1.3: Graus dias acumulados e Acúmulo de Dias Fototermais nos diferentes períodos de desenvolvimento da soja da variedade IAS 5 para as datas de semeadura utilizadas no experimento de 2004/05 em Augusto Pestana - RS.**

Período	Graus-dia (°C/dia)			Acúmulo de dias fototermais		
	19/11/04	12/12/04	14/01/05	19/11/04	12/12/04	14/01/05
<b>VE – V6</b>	284,8	258,7	286,5	9,37	8,29	10,56
<b>VE – R1</b>	582,6	522,4	420	19,17	18,16	15,82
<b>VE - R5</b>	774,9	703,4	591,8	26,38	25,72	23,29
<b>VE – R7</b>	1228,2	1060,3	811,3	39,27	38,92	38,01

**Tabela 1.4: Graus dias acumulado e Acúmulo de Dias Fototermais nos diferentes períodos de desenvolvimento da soja da variedade IAS 5 para as datas de semeadura utilizadas no experimento de 2005/06 em Augusto Pestana - RS.**

Período	Graus-dia (°C/dia)				Acúmulo de dias fototermais			
	12/12/05	26/12/05	13/01/06	31/01/06	12/12/05	26/12/05	13/01/06	31/01/06
<b>VE – V6</b>	321,1	330,9	358	271,1	7,83	7,91	11,7	7,6
<b>VE – R1</b>	592,6	583,9	453	459,5	15,91	15,6	15,23	15,41
<b>VE - R5</b>	837	772,4	681	614	24,91	24,66	24,52	24,28
<b>VE – R7</b>	1097,8	1012,6	826	668,7	40,44	40,21	38,3	36,61



A cultura da soja em cada data de semeadura nos dois anos agrícolas estudados teve como graus-dia acumulados e acúmulo de dias fototermais os valores apresentados nas tabelas (1.3) e (1.4), considerando esta duração a partir da emergência até os estádios que estava sendo realizado as principais avaliações da cultura, V6, R1, R5 e R7.

O desenvolvimento de uma população de soja é expresso pelo acúmulo de dias fototermais, este que leva em conta ação combinada da temperatura do ar e do fotoperíodo. Conforme consta nas tabelas (1.3) e (1.4) a duração de um período e do ciclo fenológico da cultura da soja é expresso em unidades fototérmicas e suas variações podem ser comparadas com as oscilações do acúmulo de graus-dia em cada ambiente estudado (sete épocas de semeadura nos dois anos agrícola). Em cada período analisado observa-se que quanto maior o acúmulo de graus-dia maior é acúmulo de dias fototermais, ou seja, menor é a taxa de desenvolvimento da cultura, pois a temperatura participa na estimativa dos dois índices.

No período da emergência até V6 ocorre menor taxa de desenvolvimento na data de semeadura do dia 14/01/05 no primeiro experimento e na semeadura do dia 13/01/06 no segundo experimento, ou seja, foi necessário maior acúmulo de dias fototermais (mais “tempo”) para atingir V6. Isto foi ocasionado, provavelmente, pela condição de umidade do solo, pois as irrigações foram sempre realizadas em todo o experimento e buscando evitar deficiências nas parcelas mais adiantadas. Isto pode ter causado um excesso hídrico na cultura semeada mais tardia, principalmente durante os períodos iniciais da cultura, quando o consumo hídrico é menor. Já nos demais períodos VE-R1, VE-R5 e VE-R7 o acúmulo de dias fototermais foi mais expressivo na 1ª época de semeadura, talvez condicionado pelas maiores variações no fotoperíodo e temperatura do ar. As maiores taxas de desenvolvimento aconteceram quando os períodos coincidiram com o final do verão, começo do outono e inverno, momento em que as temperaturas médias tendem a diminuir.

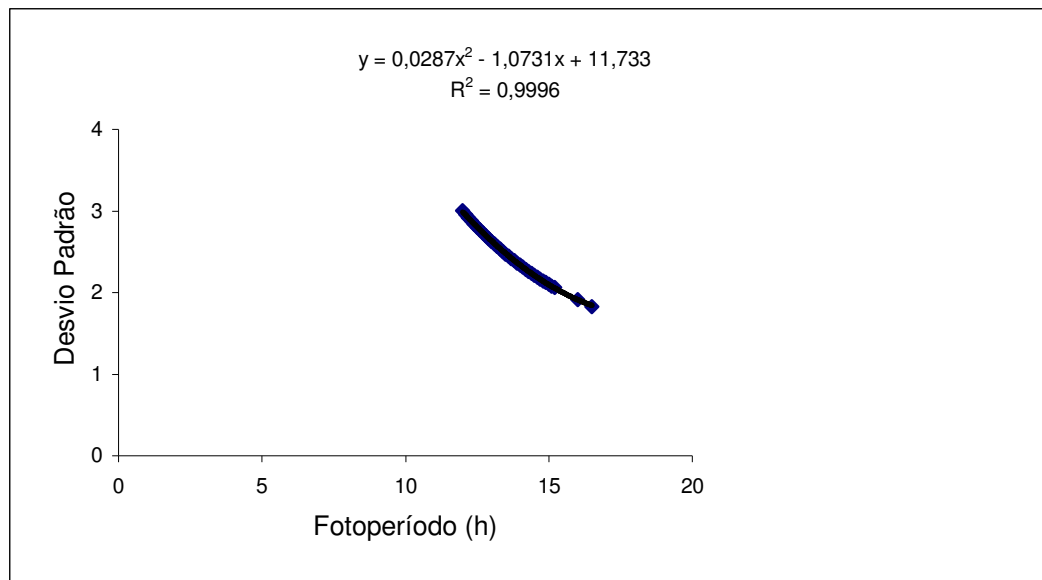


Figura 1 – Relação entre Fotoperíodo (h) e desvio padrão do somatório do Índice Fototérmico da VE – R1 do ano agrícola de 2004/05.

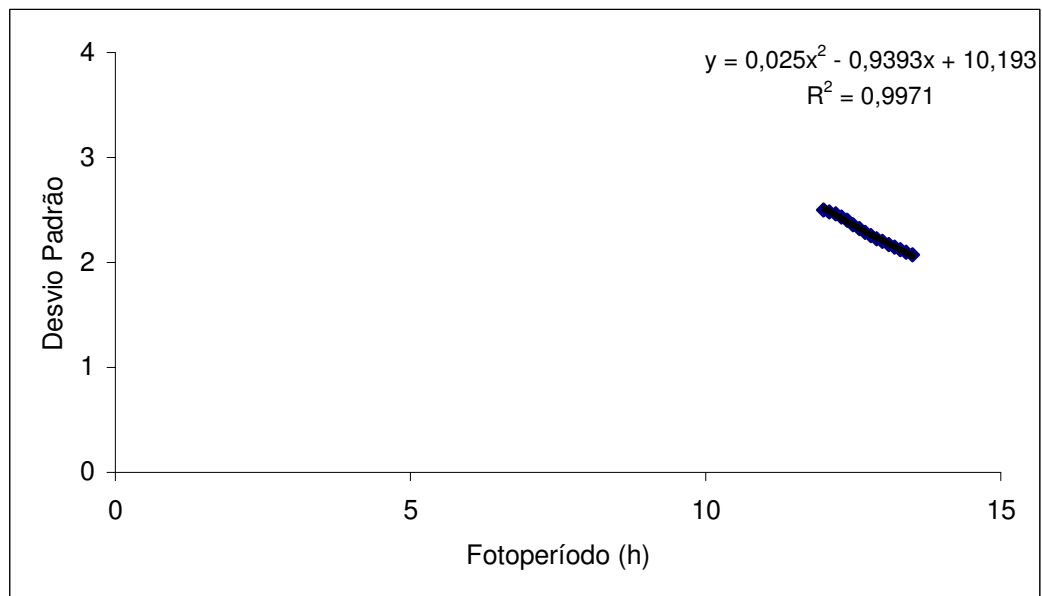


Figura 2 – Relação entre Fotoperíodo (h) e desvio padrão do somatório do Índice Fototérmico da VE – R1 do ano agrícola de 2005/06.

A sensibilidade fotoperiódica varia com o genótipo da soja. Cada cultivar possui seu fotoperíodo crítico ou ótimo para atingir o florescimento, e a soja é induzida a florescer quando o comprimento do dia é menor que determinado fotoperíodo crítico ou ótimo. Neste trabalho as figuras (1) e (2) nos mostram a análise estatística das variações do acúmulo de dias fototermais em função do fotoperíodo no período da emergência até R1, R5 e R7 em cada ano agrícola estudado. O ajuste polinomial significativo na relação entre estas duas grandezas encontra-se para ambos anos agrícolas da emergência até R1, com um coeficiente de determinação  $R^2 = 0,9996$  para o ano de 2004/05 e  $R^2 = 0,9971$  para o ano de 2005/06. Isto possibilitou o cálculo do ponto de mínimo da equação gerada por este ajuste polinomial de segundo grau para cada um dos anos, encontrando-se 18,7 para o primeiro ano agrícola e 18,8 para o segundo ano, sendo utilizado no modelo o valor de 18,8 para o fotoperíodo crítico ou ótimo.

**Tabela 1.5: Comparação entre as datas observadas e estimadas dos estádios fenológicos V6, R1, R5 e R7 em soja da variedade IAS 5 no experimento de 2004/05 em Augusto Pestana - RS.**

Estádio Fenológico	19/11/04		12/12/04		14/01/06	
	Data obs	Data est	Data obs	Data est	Data obs	Data est
<b>V6</b>	<b>28/12/04</b>	27/12/05	<b>15/01/05</b>	16/01/05	<b>21/02/05</b>	22/02/05
<b>R1</b>	<b>26/01/05</b>	26/01/05	<b>14/02/05</b>	15/02/05	<b>06/03/05</b>	07/03/05
<b>R5</b>	<b>16/02/05</b>	16/02/05	<b>05/03/05</b>	06/03/05	<b>24/03/05</b>	25/03/05
<b>R7</b>	<b>03/04/05</b>	03/04/05	<b>11/04/05</b>	12/04/05	<b>01/05/05</b>	02/05/05

**Tabela 1.6: Comparação entre as datas observadas e estimadas para os estádios fenológicos V6, R1, R5 e R7 em soja da variedade IAS 5 no experimento de 2005/06 em Augusto Pestana - RS.**

Estádio	12/12/05		26/12/05		13/01/06		31/01/06	
	Data obs	Data estim	Data obs	Data estim	Data obs	Data estim	Data obs	Data estim
<b>V6</b>	<b>16/01/06</b>	17/01/06	<b>31/01/06</b>	31/01/06	<b>24/02/06</b>	24/02/06	<b>10/03/06</b>	10/03/06
<b>R1</b>	<b>11/02/06</b>	12/02/06	<b>24/02/06</b>	24/02/06	<b>08/03/06</b>	08/03/06	<b>29/03/06</b>	29/03/06
<b>R5</b>	<b>10/03/06</b>	10/03/06	<b>17/03/06</b>	17/03/06	<b>07/04/06</b>	07/04/06	<b>25/04/06</b>	25/04/06
<b>R7</b>	<b>07/04/06</b>	07/04/06	<b>19/04/06</b>	18/04/06	<b>17/05/06</b>	23/05/06	<b>07/06/06</b>	07/06/06

Apesar da comparação das datas observadas e estimadas apresentadas nas tabelas (1.5) e (1.6) não servirem para validação do modelo, pois não se trata de dados independentes aos utilizados para sua calibração, esta verificação permite verificar a existência de alguma discrepância mais séria. O erro mais significativo ocorreu em R7 na data de plantio de 13/01/06, nas outras fases os erros de estimativa são de no máximo um dia. O estágio R7 pode ser adiantado quando a intensidade de radiação solar é baixa e acelera a queda das folhas e conseqüentemente a maturação das vagens, ou seja, o aumento do erro nesta última fase é esperado quando este fenômeno ocorrer.

Para o ajuste do submodelo linear segmentado do IAF, dois fatores foram importantes: o acúmulo de graus-dia necessário para a instalação da cultura e o acúmulo de dias fototermais para início dos estádios fenológicos de R1, R5 e R7. Analisando os valores encontrados com dados experimentais para os dois anos agrícolas, foi encontrado como acúmulo de graus-dia necessário para a instalação da cultura para o ano agrícola de 2004/05 de 215°C/dia e o ano de 2005/06 de 270°C/dia, tendo o IAF como sendo 1. O valor encontrado para o ano agrícola de 2005/06 foi

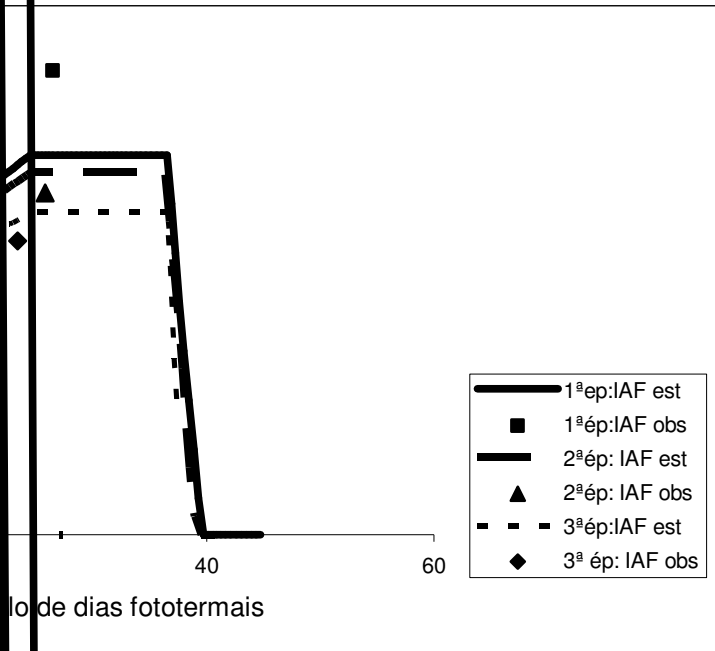
maior devido ao baixo vigor da semente utilizada, sendo que este não deve ser utilizado como referência para a cultura.

**Tabela 1.7: Índices que originaram os valores médios de Acúmulo de Dias Fototermais para cultura da soja da variedade IAS 5 nos dois anos agrícolas.**

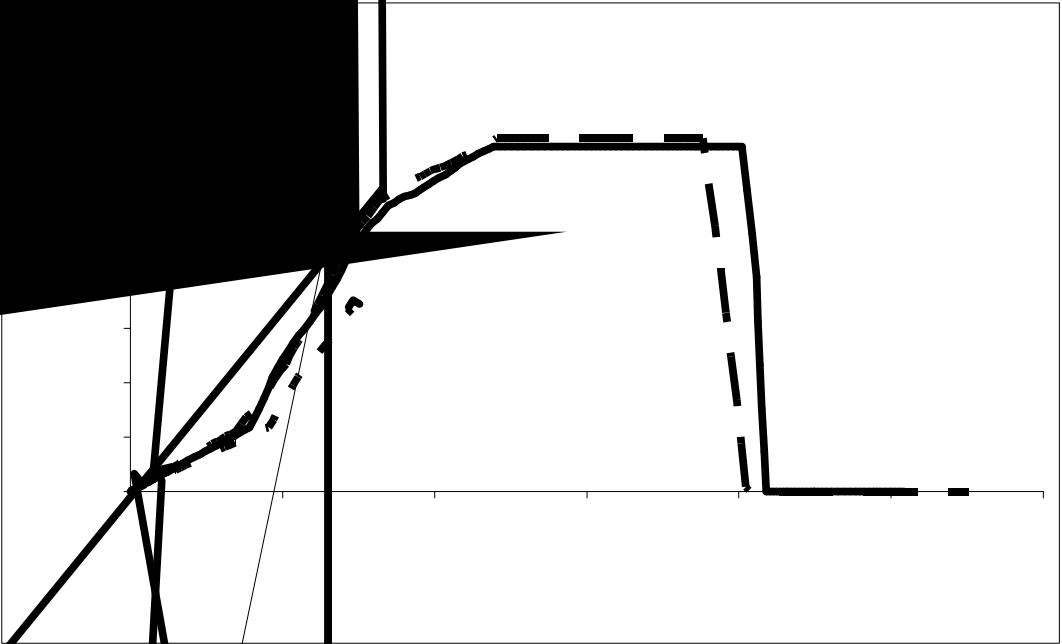
Período	Ano Agrícola de 2004/05			Ano Agrícola de 2005/06			
	19/11/04	12/12/04	14/01/05	12/12/05	26/12/05	13/01/06	31/01/06
<b>VE-R1</b>	<b>17,35</b>	<b>16,37</b>	<b>14,36</b>	<b>16,87</b>	<b>16,81</b>	<b>16,92</b>	<b>16,69</b>
<b>VE-R5</b>	<b>23,76</b>	<b>23,15</b>	<b>20,92</b>	<b>25,70</b>	<b>23,93</b>	<b>27,01</b>	<b>25,24</b>
<b>VE-R7</b>	<b>40,61</b>	<b>36,76</b>	<b>33,15</b>	<b>36,02</b>	<b>34,98</b>	<b>36,82</b>	<b>35,51</b>

O acúmulo de dias fototermais para início dos estádios fenológicos R1, R5 e R7 foi encontrado a partir das equações (1.39), (1.40) e (1.41) cujos resultados constam na tabela (1.7). Estes índices representam os acúmulos de dias fototermais em cada período (VE-R1, VE-R5, VE-R7), calculados utilizando o fotoperíodo crítico ou ótimo estimado neste trabalho.

A média aritmética entre os acúmulos de dias fototermais nos tratamentos dos dois experimentos foi o que definiu a constante fototérmica para o início dos estádios fenológicos, sendo encontrado para R1, R5 e R7 os respectivos valores: 16,48; 24,24 e 36,26.



IAF estimado e IAF observado com o Acúmulo de dias fototermais no 2004/05 em Augusto Pestana - RS.



A verificação dos erros entre os valores de IAF estimado (através do modelo matemático) e o IAF observado (através de dados experimentais) pode ser realizada a partir da figura 03 seguinte, em que a evolução destas duas grandezas está sendo apresentada em função das variações do acúmulo de dias fototermais para as diferentes datas de semeadura em cada ano agrícola. Observa-se que alguns valores medidos estão distantes do estimado e que estes apresentam pequenas incoerências no seu comportamento. Por exemplo, no caso da quarta data de plantio do experimento de 2005/06 não ocorreu aumento de IAF entre R1 e R5 o que não ocorre quando a cultura está bem suprida de água e nutrientes. O comportamento da curva estimada apresenta algumas discrepâncias em relação às observações de campo, principalmente em relação às diferenças de IAF<sub>máx</sub> estimada e observada que podem ser afetadas por outro fator como a radiação incidente e que pode ser incorporada no modelo a partir de novos trabalhos.

Apesar das imperfeições diagnosticadas, o comportamento da curva de IAF estimada, em função dos graus dia acumulados em cada período de desenvolvimento estimados pela soma fototérmica, está de acordo com as variações observadas de IAF.

**Tabela 1.8: Graus dias acumulados em cada subperíodo avaliado em soja da variedade IAS 5 nos experimentos de 2004/05 e 2005/06 em Augusto Pestana -RS.**

Subperíodo	Graus-dia acumulados em 2004/05 (°C/dia)			Graus-dia acumulados em 2005/06 (°C/dia)			
	19/11/04	12/12/04	14/01/05	12/12/05	26/12/05	13/01/06	31/01/06
<b>VE - V6</b>	284,8	258,7	286,5	321,1	330,9	358	271,1
<b>V6 - R1</b>	297,8	263,7	133,5	271,5	253	95	188,4
<b>R1 - R5</b>	192,3	181	171,8	244,4	188,5	228	154,5
<b>R5 - R7</b>	-	-	-	260,8	240,2	95	54,7

Analisando a tabela (1.8) e comparando-as com as figuras (3) e (4) que trazem o IAF estimado e o IAF observado, pode-se verificar que as variações dos graus-dia acumulados influenciam no crescimento ou decréscimo do IAF máximo em cada subperíodo estudado.

No experimento de 2004/05 no subperíodo que vai da VE até V6 o maior acúmulo de graus-dia aconteceu na 3ª época de plantio e conseqüentemente teve-se os maiores valores para o IAF estimado e observado, sendo estes respectivamente 2,05 e 1,4. Para o subperíodo de V6 até R1 e R1 até R5 o maior acúmulo de graus-dia foi na 1ª época de semeadura, tendo os seguintes valores para o IAF máximo estimado e observado 5,47 e 5,74. Neste ano agrícola não foi feita a modelagem para o IAF máximo no estágio fenológico de R7, pois devido a ocorrência de chuvas intensas ocorreu a perda prematura das folhas, não sendo possível a coleta de dados para a determinação do IAF máximo observado.

Em 2005/06 o maior acúmulo de graus-dia no subperíodo de VE até V6 foi na 3ª época de semeadura, em que os valores do IAF máximo estimado e observado foram de 2,2 e 2,35 respectivamente. Para os subperíodos entre V6 e R1, R1 e R5 e R5 e R7, teve-se uma maior soma térmica na 1ª época tendo como IAF máximo estimado e observado para o subperíodo de V6 até R1 5,05 e 4,98; R1 e R5 6,48 e 7,09 e para R1 até R7 6,48 e 4,39.

**Tabela 1.9: Índice de Área Foliar (IAF) observado e estimado da soja da variedade IAS 5 no ano agrícola de 2004/05.**

Estádios Fenológicos	19/11/04		12/12/04		14/01/05	
	IAF obs	IAF estim	IAF obs	IAF estim	IAF obs	IAF estim
V6	1,41	1,72	1,6	1,54	1,4	2,05
R1	5,74	5,47	5,16	5,04	3,82	4,02
R5	7,6	6,19	5,57	5,9	4,79	5,12
R7	**	**	**	**	**	**

**\*\* Neste ano agrícola não foi avaliado o IAF em R7.**



**Tabela 1.10: Índice de Área Foliar (IAF) observado e estimado da soja da variedade IAS 5 no ano agrícola de 2005/06.**

Estádios Fenológicos	12/12/05		26/12/05		13/01/06		31/01/06	
	IAF obs	IAF estim	IAF obs	IAF estim	IAF obs	IAF estim	IAF obs	IAF estim
V6	1,64	1,44	2,03	1,17	2,20	2,35	1,05	1,16
R1	4,98	5,05	5,3	4,93	2,81	3,99	4,13	3,47
R5	7,09	6,48	5,77	6,33	4,59	5,49	4,28	4,05
R7	4,39	6,48	3,21	6,33	2,69	5,49	1,23	4,05

Observa-se uma variação do IAF de uma época para outra comparando o mesmo subperíodo, conforme evidenciam as tabelas (1.9) e (1.10). Camargo et al. (1987) explica este fator dizendo que conforme se atrasa à sementeira o GD acumulado para a cultura da soja diminui, e isto está relacionado com a diminuição do fotoperíodo, fazendo com que o IAF decresça, pois o florescimento da soja é induzido quando a duração do período luminoso (fotoperíodo) começa a reduzir, portanto, em condições de dias curtos, verifica-se menor duração do subperíodo vegetativo. E ainda ressalta que para a obtenção de altas produtividades, é importante que a planta alcance o mais rápido possível o valor do IAF crítico ou ótimo durante a fase vegetativa inicial, no entanto sem ultrapassar logo este valor.

O submodelo linear segmentado do IAF, determinado pelos graus-dia acumulados e pelas variações do acúmulo de dias fototermais em cada um dos estádios fenológicos estudados neste trabalho mostrou-se coerente com os dados observados, obtidos experimentalmente.

**Tabela 1.11: Radiação fotossinteticamente ativa interceptada (RFAint) acumulada pela soja da variedade IAS 5 em cada subperíodo nos experimentos de 2004/05 e 2005/06, em Augusto Pestana - RS.**

Subperíodo	RFAint em 2004/05 (MJ/m <sup>2</sup> )			RFAint em 2005/06 (MJ/m <sup>2</sup> )			
	19/11/04	12/12/04	14/01/05	12/12/05	26/12/05	13/01/06	31/01/06
<b>VE - V6</b>	135,26	102,68	114,18	98,47	87,49	157,12	115,91
<b>V6 - R1</b>	241,54	205,24	85,1	193,35	176,91	81,65	113,65
<b>R1 - R5</b>	162,8	152,7	115,98	216,36	167,61	231,29	211,35
<b>R5 - R7</b>	224,75	188,82	183,42	297,76	253,68	270,19	223,78

A radiação solar e a temperatura desempenham papéis diferentes do ponto de vista fisiológico. A radiação funciona como a fonte de energia que será convertida em biomassa vegetal (HEEMST, 1986), ao passo que a temperatura está associada à eficiência dos processos metabólicos envolvidos nessa conversão, pelo fato de alterar a plasticidade de diversas enzimas da planta (BONHOMME, 1986). Contudo ambas condicionam os processos de crescimento e desenvolvimento da soja.

**Tabela 1.12: Eficiência de uso da RFAint da nos experimentos de 2004/05 e 2005/06 em Augusto Pestana - RS.**

Épocas de Semeadura 2004/05	EUR em 2004/05 (MJ/m <sup>2</sup> )	Datas de Semeadura 2005/06	EUR em 2005/06 (MJ/m <sup>2</sup> )
19/11/04	1,281443	12/12/05	1,163949
12/12/04	1,866609	26/12/05	0,868346
14/01/05	1,174363	13/01/06	0,802182
—	—	31/01/06	0,780359

A matéria seca produzida por uma cultura é produto de três fatores: a radiação disponível por unidade de área; a fração de radiação interceptada pela cultura e a eficiência de uso da RFAint. Então para estimar a matéria seca pelo modelo, foi determinada a eficiência de uso da RFAint, a partir dos valores apresentados na tabela (1.12), em que foi determinado e utilizado neste trabalho uma EUR de 1,13.

No experimento de 2005/06 as variações na EUR podem ser explicadas pela idade das folhas, quanto mais velhas menor é a EUR, pois o aparato fotossintético necessita de maior gasto energético para o seu reparo. A segunda data de semeadura do ano agrícola de 2004/05 mostra a maior EUR, devido à multiplicidade de fatores que podem afetar o índice é difícil de identificar o que definiu este maior valor, mas cabe salientar que se trata de uma época em que os estádios fenológicos iniciais, no qual se formam as folhas, apresentam-se no verão, que as temperaturas médias e a radiação incidente foram mais elevadas favorecendo assim os processos de fotossíntese.

**Tabela 1.13: Radiação Fotossinteticamente Ativa Incidente (RFAinc) nos anos agrícolas de 2004/05 e 2005/06.**

<b>Épocas de Semeadura</b>	<b>RFAinc em 2004/05 (MJ/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Épocas de Semeadura</b>	<b>RFAinc em 2005/06 (MJ/m<sup>2</sup>)</b>
<b>19/11/04</b>	746,19	<b>12/12/05</b>	633,49
<b>12/12/04</b>	604,09	<b>26/12/05</b>	628,81
<b>14/01/05</b>	422,28	<b>13/01/06</b>	603,25
		<b>31/01/06</b>	517,07

Valores encontrados para a EUR da cultura da soja são variados. Autores como WARREN<sup>7</sup> (1971) encontrou 1,3g/MJ, MAKASEKO & GOTOH (1983) e MUCHOW et al. (1993) encontraram 0,6 a 2,67 g/MJ , enquanto WEBER (1966) e MUCHOW (1985) obtiveram os valores mais baixos 0,72 a 0,6. No modelo proposto foi utilizado para EUR o valor de 1,13 , este é a média dos dados da tabela (1.7). Sendo que a idade da folha influencia na capacidade de

EUR, seria importante que em sua estimativa fosse considerada este tempo de vida médio da folha.

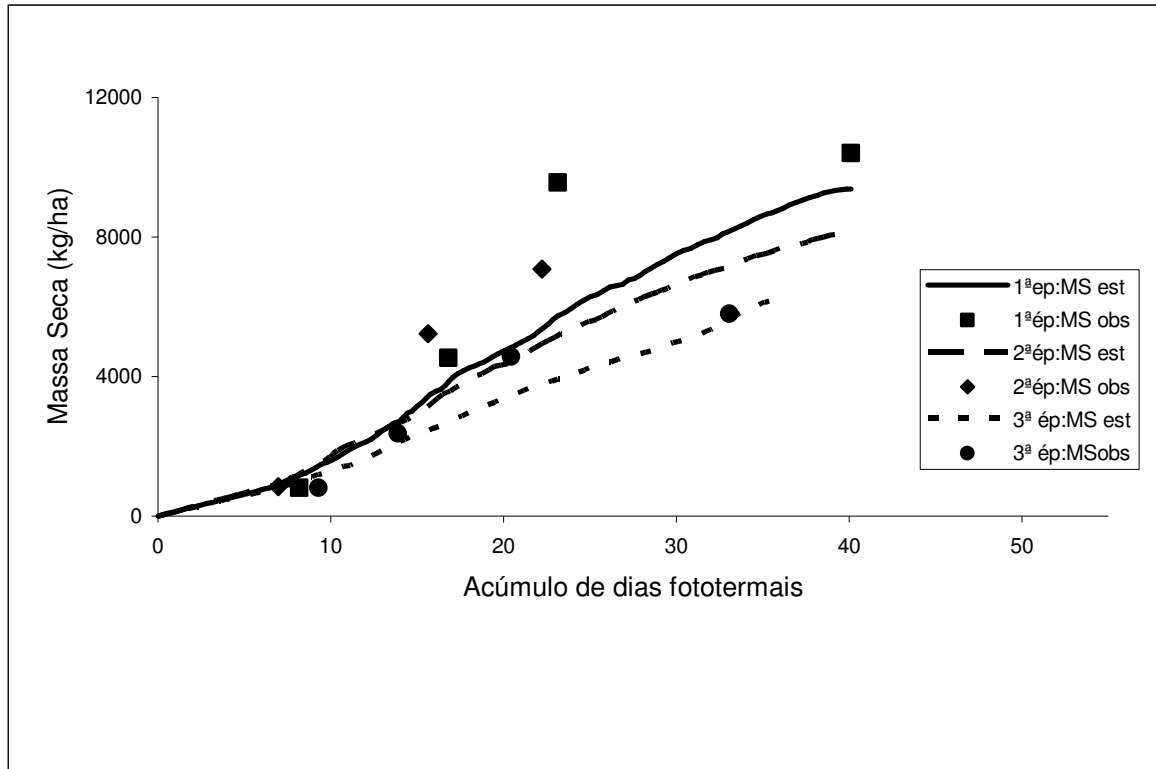


Figura 5 - Evolução da Massa Seca Estimada (MS est) e Observada (MS obs) em função do Acúmulo de dias fototermais da soja da variedade IAS 5 no ano agrícola de 2004/05.

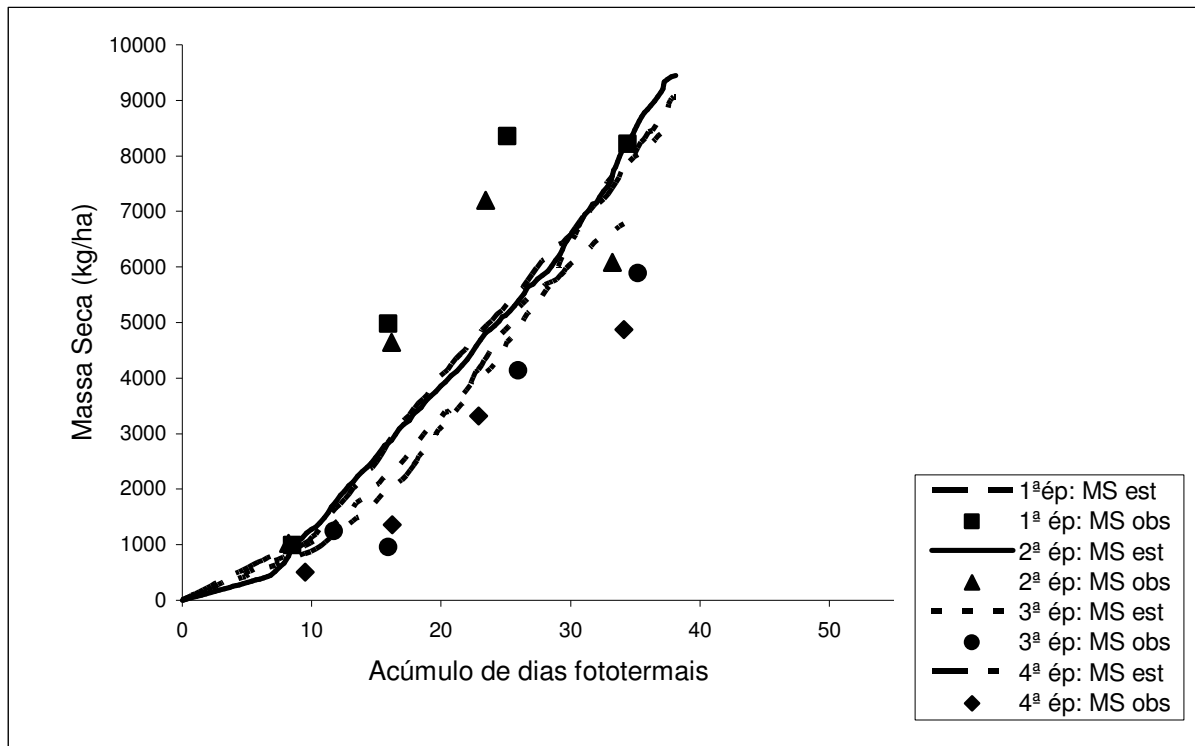


Figura 6 – Evolução da Massa Seca Estimada (MS est) e Observada (MS obs) em função do Acúmulo de dias fototermais da soja da variedade IAS 5 no ano agrícola de 2005/06.

As figuras (5) e (6) mostram que a massa seca acumulada pela parte área da cultura variam entre as épocas de semeadura. As épocas mais tardias apresentam um acúmulo de matéria seca menor, devido à diminuição do acúmulo de graus-dia, em função da diminuição das temperaturas ambientes. Também pode-se associar as variações de produção de massa seca às diferenças de IAF mostradas pelas tabelas (1.9) e (1.10), visto que a eficiência de interceptação, importante no processo de produção de massa seca é dependente dentre outros fatores do IAF.

Comparando, ainda nas figuras (5) e (6), os valores de massa seca acumulada observada e estimada pelo modelo verificam-se que as duas primeiras datas de semeadura de cada experimento apresentam valores observados maiores do que os valores estimados e que nas últimas duas datas de semeadura no segundo experimento os valores observados estão abaixo do estimado pelo modelo. Esta situação necessariamente esta relacionada com a redução da EUR

entre as datas de semeadura, sendo que com o atraso no plantio ocorre à redução da EUR, fato este que não foi considerado no modelo.

A redução da EUR entre as datas de semeadura tardia pode estar relacionada com o menor ângulo de inclinação do sol em relação à superfície cultivada, que ocorre após o solstício de verão, aumentando a taxa de reflexão da cultura, diminuindo conseqüentemente a eficiência de absorção da RFAint que está incorporada na EUR. Outro fator que pode estar reduzindo a EUR é a redução da temperatura que fica abaixo da temperatura ótima no final do ciclo para as datas de semeadura tardia.

O modelo que foi calibrado no presente trabalho não inclui as alterações causadas na EUR devido à multiplicidade de fatores que estão relacionados com o processo e ao mesmo tempo inter-relacionados entre si. Os fatores acima mencionados servem como exemplo desta situação, pois o ângulo de inclinação do sol e a temperatura afetam a EUR e estão intimamente correlacionados. Este fato dificulta a dissociação dos efeitos e impõe a necessidade de experimento em ambientes controlados ou com um número de experimento maior e em locais diversos para reduzir a correlação entre estes fatores.

Outro fenômeno que podemos observar nas figuras (5) e (6) é que entre as duas últimas amostragens, dentro de cada época de semeadura, ocorre a redução do acúmulo de massa seca. Este fenômeno ocorre devido a não ocorrência de novas folhas e conseqüente redução da EUR com o envelhecimento das folhas durante o período de enchimento de grãos. Desta forma, para melhorar o presente modelo de simulação, fica clara a necessidade de estimar as variações da EUR.

Conforme Câmara & Heiffig (2000) o acúmulo de matéria seca acentua-se a partir de V5, intensifica-se durante o final do subperíodo vegetativo, mantendo-se elevado até o início de enchimento de grãos, quando acentua-se a translocação de massa seca dos órgãos vegetativos para os reprodutivos.

Villa Nova (2005) afirma que durante os estádios vegetativos, em condições nutricionais ótimas e sem deficiência hídrica, assume-se que a produtividade potencial da massa seca (produção por unidade de área) é dependente da temperatura do ar e da disponibilidade de energia (a qual pode ser estimada por intermédio do número de horas de insolação).

A distribuição de matéria seca acontece levando em conta a fase fenológica em que a cultura se encontra, sendo assim ainda no estágio vegetativo a distribuição da massa seca total é entre caule e folhas, em que as folhas receberam uma maior quantidade de recursos.

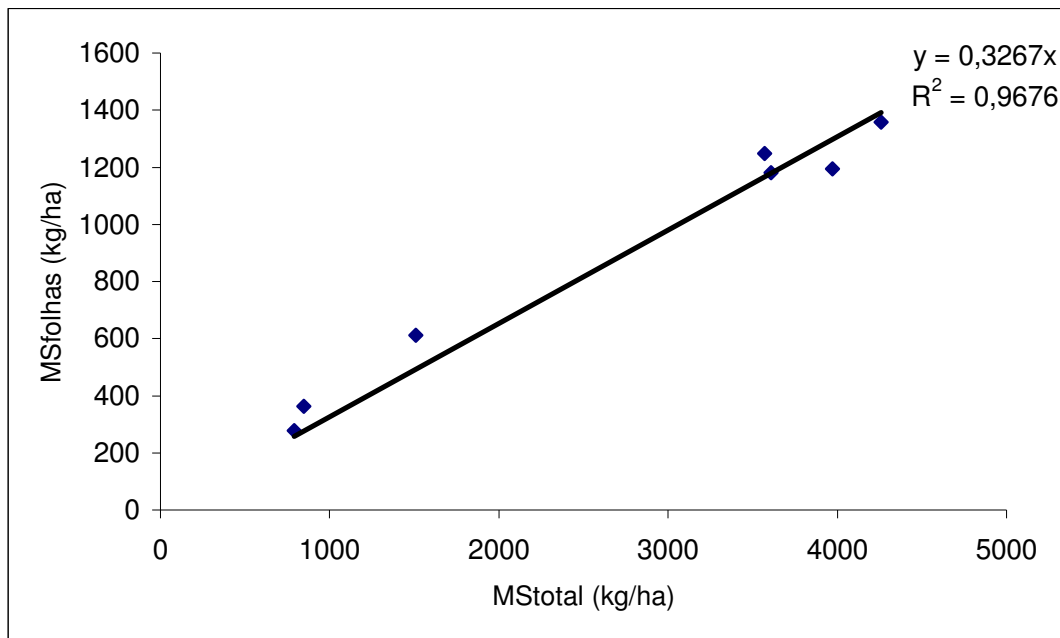


Figura 7 – Análise de Regressão da relação entre massa seca total (MStotal) acumulada pela parte área da cultura e massa seca de folhas (MSfolhas) da soja da variedade IAS 5 para a determinação dos coeficiente empíricos do modelo matemático para o subperíodo V6 até R1.

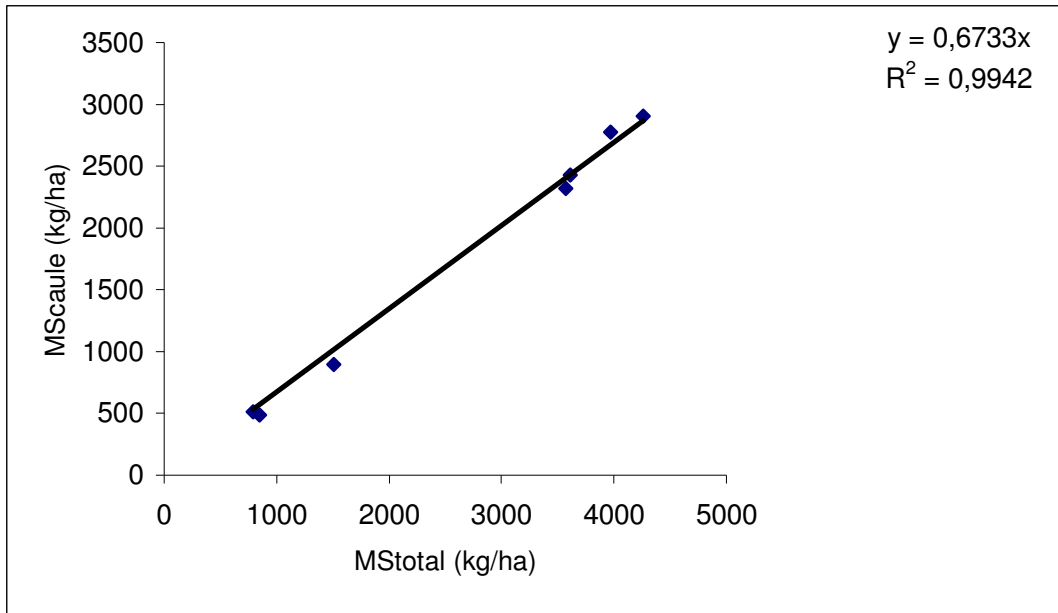


Figura 8 - Análise de Regressão da relação entre massa seca total (MStotal) acumulada pela parte área da cultura e massa seca de caule (MScaule) da soja da variedade IAS 5 para a determinação dos coeficiente empíricos do modelo matemático para o subperíodo V6 até R1.

Entre R1-R5 uma porção da massa seca total acumulada pela parte área da cultura começa a ser distribuída para vagens, pois no período anterior somente era distribuída entre caule e folhas. Já no subperíodo de R5-R7, ocorre à repartição entre caule e vagens, porém tornam-se os maiores drenos para alocação de fitomassa.

Para a determinação dos coeficientes empíricos a serem colocados no modelo matemático nos subperíodos R1-R5 e R5-R7 no processo de distribuição da massa seca total em vagem (MSv) foi inicialmente, levado em consideração dois parâmetros como determinantes das variações observadas pelos dados empíricos deste componente, que são a massa seca total acumulada pela parte área da cultura (MStotal) e a RFAinc. Portanto utilizando os dados coletados experimentalmente entre o período de R1 até R5 e R1 até R7, onde os coeficientes foram determinados através de uma regressão múltipla. O R-quadrado obtido em R1 até R7 foi de 0,90 enquanto que com os dados do subperíodo de R1 e R5 foi 0,87, como o mais significativo foi o obtido com os dados de R1 até R7, com os coeficientes determinados neste subperíodo



chegou-se na equação (1.47) que determina a distribuição de massa seca acumulada pela parte área da cultura em massa seca de vagem (MS<sub>v</sub>) de R1 a R7.

$$MS_v = -447,848 + 0,2426.MS_{total} + 1,511744.RFA_{inc} \quad (1.47)$$

Já para a determinação da distribuição da massa seca entre caule e folhas, no subperíodo de R1 até R5 foi obtido o coeficiente empírico 0,8764, que representa a diferença entre a massa seca total e a massa seca de vagens encontrada experimentalmente e apresentada na figura (9). Este coeficiente no modelo multiplica 0,3267 na distribuição de folhas e 0,6733 na distribuição de caule.

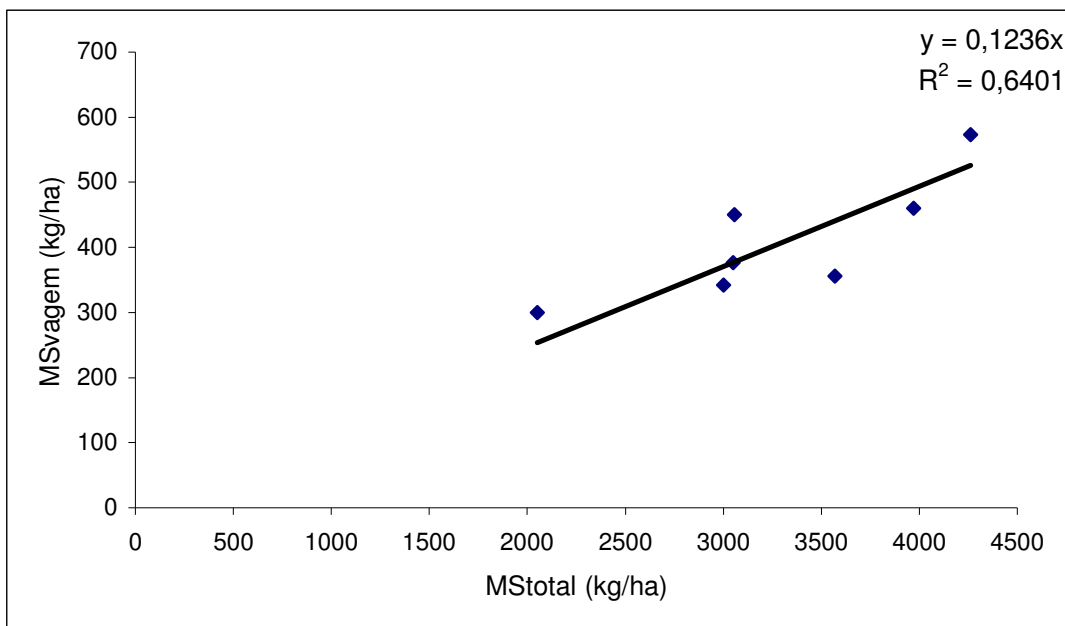


Figura 9 - Análise de Regressão da relação entre massa seca total acumulada pela parte área da cultura (MStotal) e massa seca vagem (MSvagem) da soja da variedade IAS 5 para a determinação do coeficiente empírico do modelo matemático para o subperíodo R1 e R5.

A partir da figura (10) foi obtido o coeficiente 0,153 este utilizado para a distribuição da massa seca acumulada pela parte área da cultura em massa seca de caule no subperíodo R5 a R7, pois representa o valor que sobra da distribuição em vagem.

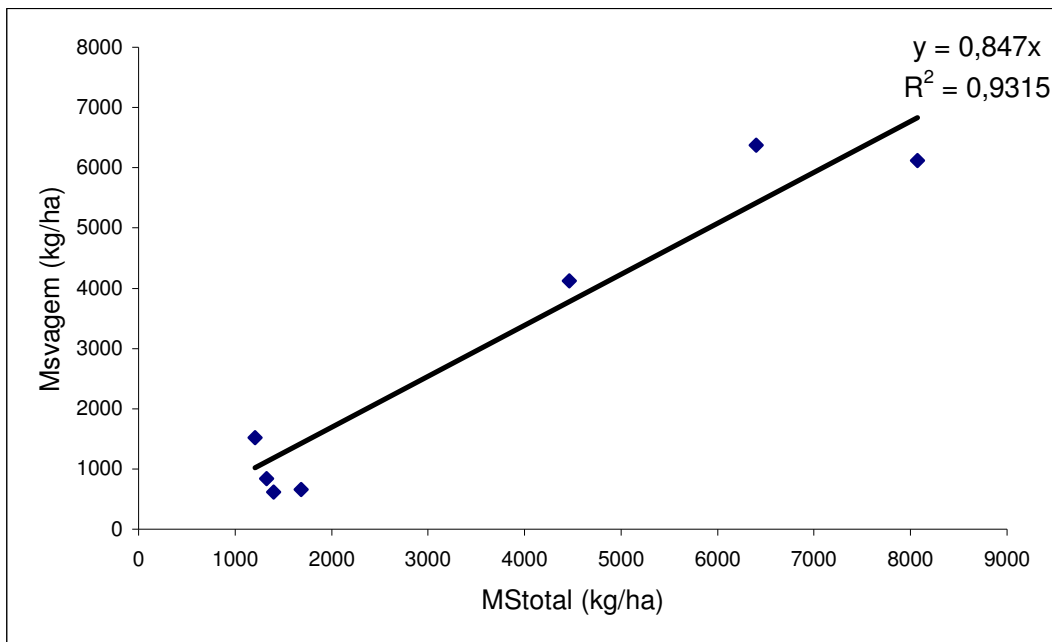


Figura 10 - Análise de Regressão da relação entre massa seca total acumulada pela parte área da cultura (MStotal) e massa seca vagem (MSvagem) da soja para a determinação do coeficiente empírico do modelo matemático para o subperíodo R5 e R7.

Analisando as figuras (11 a 17) que representam a distribuição de massa seca acumulada pela parte área da cultura apresentadas logo acima, observa-se que os valores de caule observado e estimado estão distantes na data de semeadura de 19/11/04, já para folhas os valores afastam-se significativamente na data de 12/12/05 e para o componente vagem nas datas de plantio de 12/12/04, 26/12/05, 13/01/06 e 31/01/06. O que configura-se pode ser explicado pela heterogeneidade da população de plantas ou até mesmo por erros cometidos durante o manuseio das amostras (coleta, separação e pesagem), pois não podemos caracterizar estas variações ocorridas entre o estimado e o obtido experimentalmente como sendo um erro na obtenção dos coeficientes do modelo matemático, pois as oscilações ocorrem em pontos específicos.

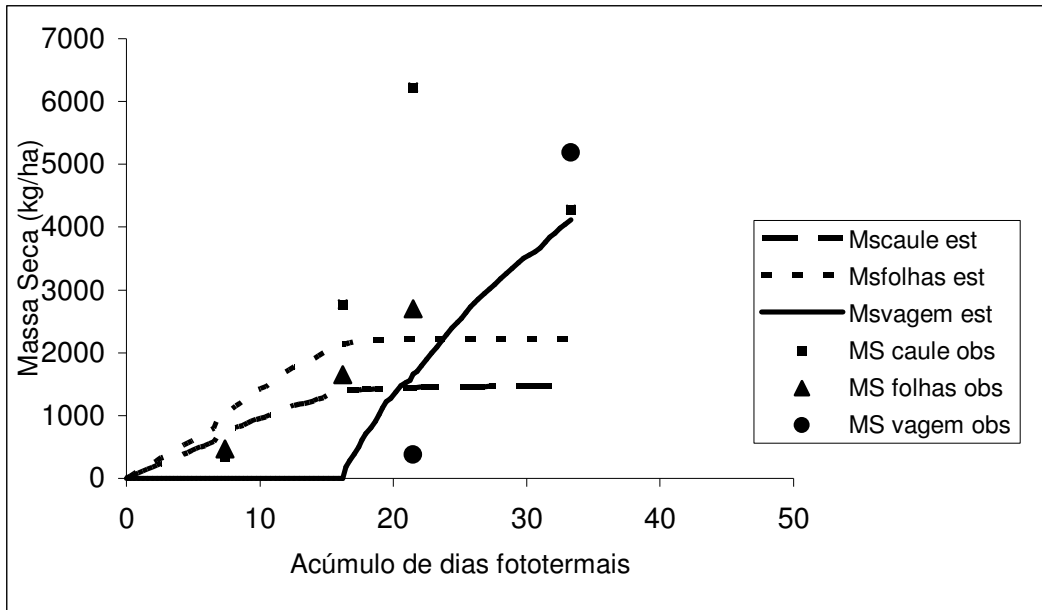


Figura 11 – Distribuição da Massa Seca acumulada pela parte área da cultura da soja estimada pelo modelo matemático (est) e observada (obs) no plantio do dia 19/11/04 do ano agrícola de 2004/05.

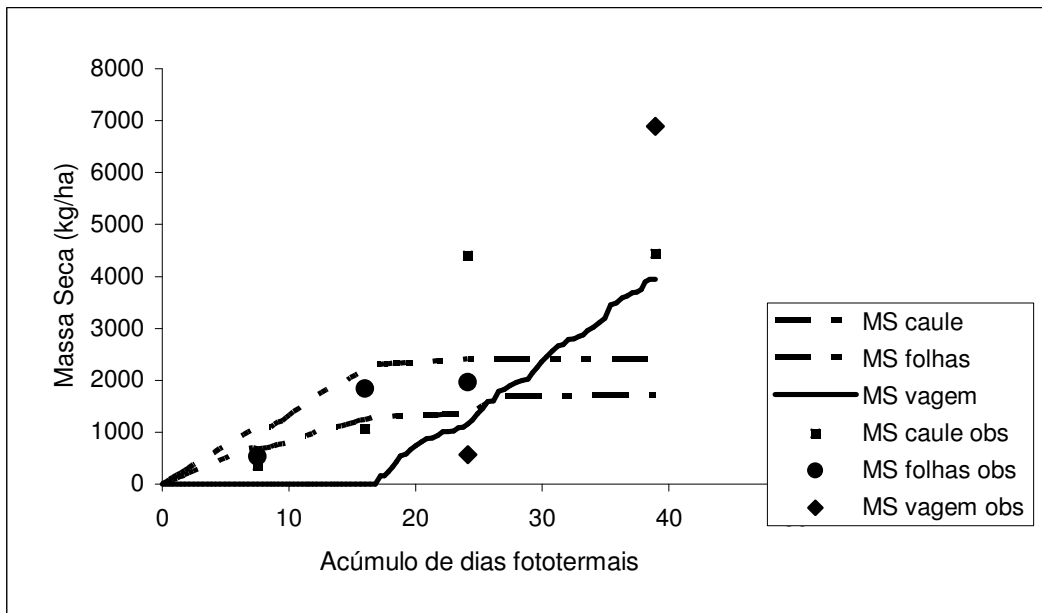


Figura 12 – Distribuição da Massa Seca acumulada pela parte área da cultura da soja estimada pelo modelo matemático (est) e observada (obs) no plantio do dia 12/12/04 do ano agrícola de 2004/05.

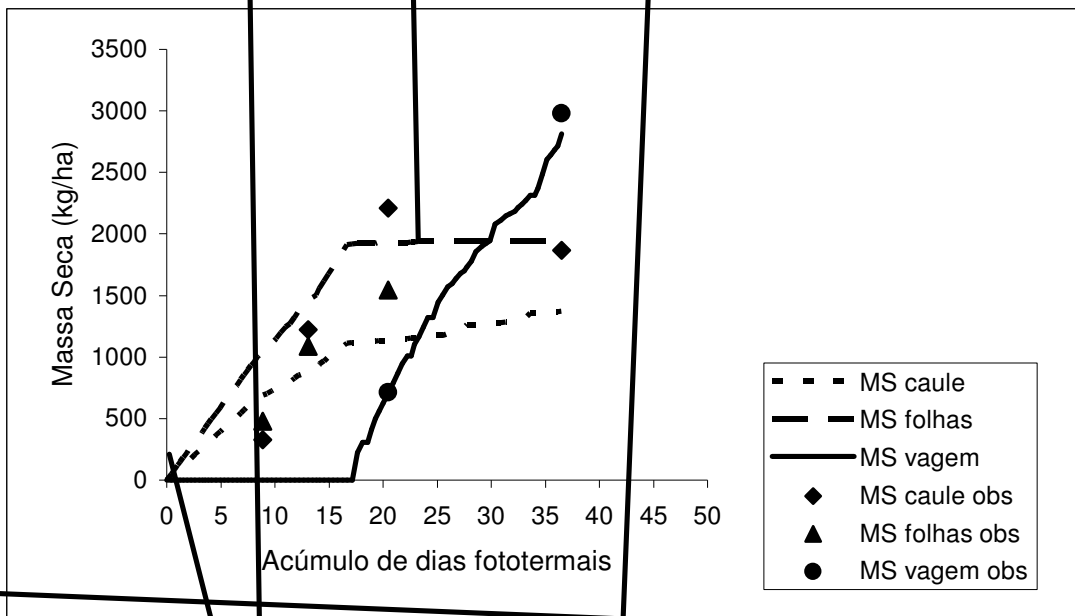
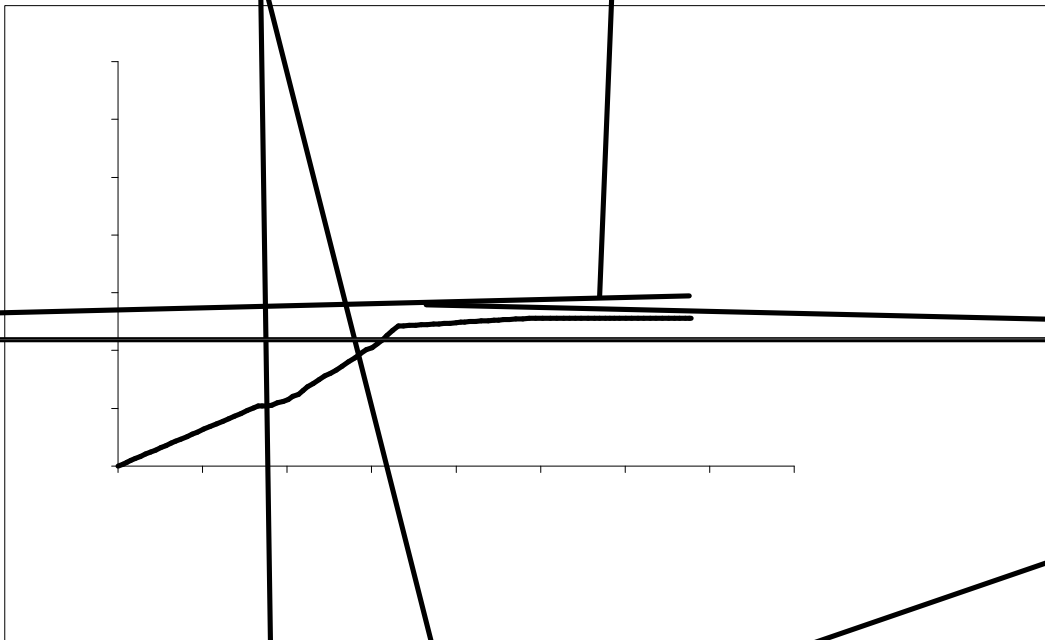


Figura 13 – Distribuição da Massa Seca acumulada pela parte área da cultura da soja estimada pelo modelo matemático (est) e observada (obs) no plantio do dia 14/01/05 do ano agrícola de 2004/05.



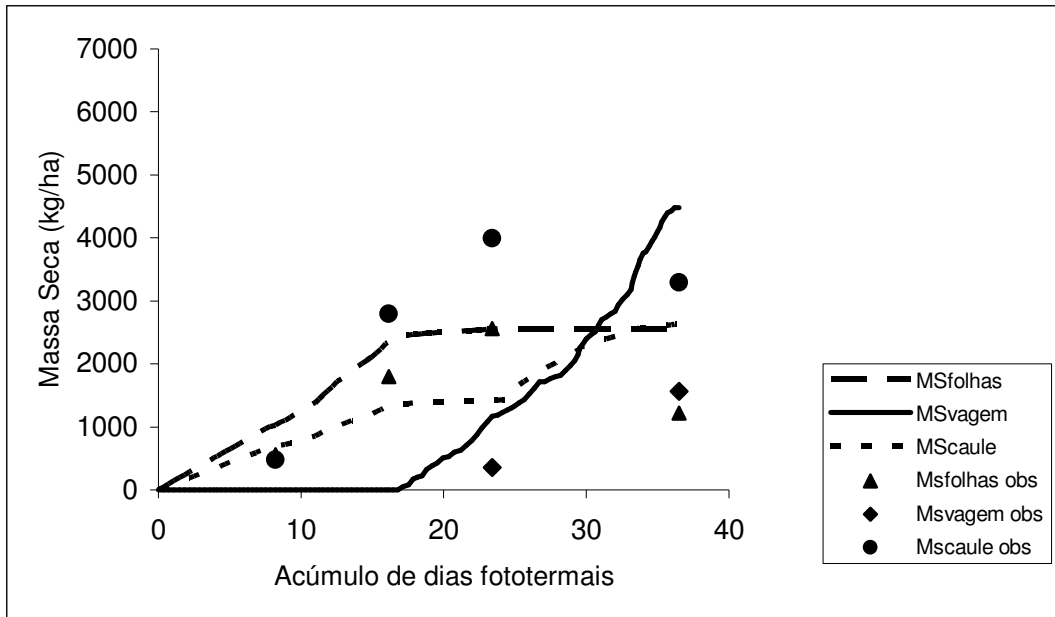


Figura 15 – Distribuição da Massa Seca acumulada pela parte área da cultura da soja estimada pelo modelo matemático (est) e observada (obs) no plantio do dia 26/12/05 do ano agrícola de 2005/06.

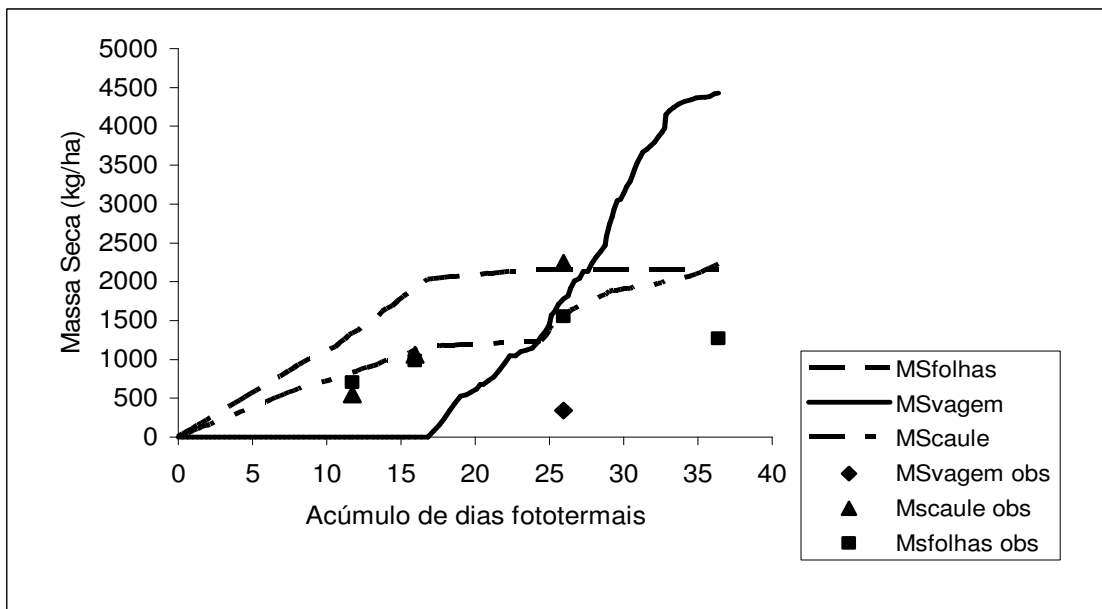


Figura 16 – Distribuição da Massa Seca acumulada pela parte área da cultura da soja estimada pelo modelo matemático (est) e observada (obs) no plantio do dia 13/01/06 do ano agrícola de 2005/06.

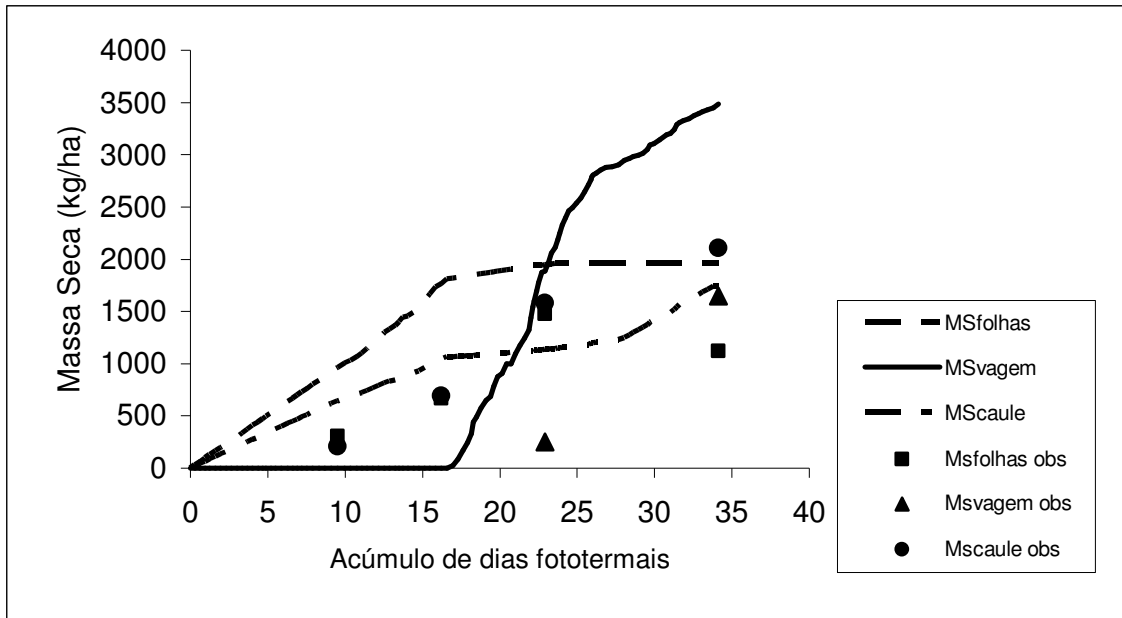


Figura 17 – Distribuição da Massa Seca acumulada pela parte área da cultura da soja estimada pelo modelo matemático (est) e observada (obs) no plantio do dia 31/01/06 do ano agrícola de 2005/06.

Para possibilitar a avaliação do desempenho da população de plantas, o índice de colheita foi estimado para cada ano agrícola, este que determina a razão entre o rendimento de grãos da cultura e o rendimento biológico, comumente representado pela matéria seca aérea acumulada, através do modelo energético. Encontraram-se os seguintes resultados, conforme a tabela (1.14).

Comparado os Índices de Colheita observados com os estimados pelo modelo matemático, percebe-se que as últimas duas datas de semeadura do ano de 2004/05 e a primeira data de plantio no ano agrícola de 2005/06 foram as que mostraram uma maior aproximação entre os valores observados e estimados.

O ano agrícola de 2004/05 a 1ª época (19/11/04) mostrou o melhor rendimento na relação entre os parâmetros empíricos de peso da massa seca de grãos e massa seca acumulada pela parte área da cultura, enquanto que no ano de 2005/06 o maior rendimento foi na 2ª época (26/12/06).

**Tabela 1.14: Índice de Colheita (Ic) em soja da variedade IAS 5 observado (obs) e estimado (estim) nos anos agrícolas de 2004/05 e 2005/06.**

Data de Semeadura	Índice de colheita (Ic) (2004/05)		Data de Semeadura	Índice de colheita (Ic) (2005/06)	
	Ic obs	Ic estim		Ic obs	Ic estim
19/11/04	0,62	0,44	12/12/05	0,40	0,41
12/12/04	0,48	0,49	26/12/05	0,52	0,47
14/01/05	0,41	0,40	13/01/06	0,30	0,52
			31/01/06	0,26	0,52

Para verificação da coerência do modelo matemático foram realizadas algumas simulações no modelo do ano agrícola de 2004/05 com as seguintes épocas 16/10, 12/11, 30/10 e no modelo do ano de 2005/06 com as datas de 25/10, 15/11 e 01/12. Como também simulações utilizados os dados de entrada do modelo de temperatura média e radiação solar global de outros anos agrícolas (1981/82, 1982/83, 1983/84, 1984/85), mas com as épocas de semeadura utilizadas nos anos de 2004/05 e 2005/06.

Analisando as simulações com épocas de semeadura antecipadas com relação as que tínhamos experimentalmente, as quais constam em anexo, observa-se que o comportamento do submodelo do IAF mostrar-se eficiente em suas estimativas, a massa seca acumulada pela parte área da cultura apresenta valores de acordo com os limites esperados e o submodelo de repartição desta massa seca nos componentes folha, caule e vagem, também apresenta-se eficaz.

As figuras resultantes das simulações com outros anos agrícolas com as mesmas datas de semeadura dos anos agrícola de 2004/05 e 2005/06, encontram-se em anexos e as tabelas (1.15 a 1.18) mostram os principais parâmetros gerados pelo modelo a partir destas simulações anos, para as avaliações e análise dos mesmos.

Tabela 1.15: Parâmetros estimados pelo modelo matemático no ano agrícola de 1981/82.

Parâmetros	Ano Agrícola de 1981/82					
	323	346	360	13	14	31
IAF	6,19	5,86	5,32	4,87	4,79	3,49
MSacum (kg/ha)	10586,2	9680,5	8944,5	7777,9	7507,8	7523,2
MSvagem (kg/ha)	5167,2	4987,5	4539,6	3943,6	3834,1	3997,9
Duração (dias)	215	190	176	163	160	142
RFAinc (MJ/m <sup>2</sup> )	1748,33	1493,53	1338,41	1203,83	1173,27	1012,44

Tabela 1.16: Parâmetros estimados pelo modelo matemático no ano agrícola de 1982/83.

Parâmetros	Ano Agrícola de 1982/83					
	323	346	360	13	14	31
IAF	5,56	6,11	6,13	5,37	5,27	4,37
MSacum (kg/ha)	7231,5	7375,8	7142,5	6468,5	6330,3	5682,1
MSvagem (kg/ha)	2238,1	2178,3	1794,7	1557,5	1482,1	941,3
Duração (dias)	189	164	149	136	133	115
RFAinc (MJ/m <sup>2</sup> )	1376,33	1144	997,29	886,84	833,25	687,10



Tabela 1.17: Parâmetros estimados pelo modelo matemático no ano agrícola de 1983/84.

Parâmetros	Ano Agrícola de 1983/84					
	323	346	360	13	14	31
IAF	7,62	7,6	7,21	6,44	6,22	5,63
MSacum (kg/ha)	9226,6	9037,5	8158,4	7244,2	7450	6522,9
MSvagem (kg/ha)	3522,3	2996,9	2229,6	1958,7	1911,1	1571,4
Duração (dias)	199	175	160	155	152	134
RFAinc (MJ/m <sup>2</sup> )	1536	1287,2	1143,35	1028,73	997,41	841,3

Tabela 1.18: Parâmetros estimados pelo modelo matemático no ano agrícola de 1984/85.

Parâmetros	Ano Agrícola de 1984/85					
	323	346	360	13	14	31
IAF	7,87	7,7	7,08	6,47	6,36	5,27
MSacum (kg/ha)	9578,5	8741,1	8287,1	7931,8	7928,3	7719,2
MSvagem (kg/ha)	3518,8	2802,3	2733,4	2512,8	2479,7	2776,2
Duração (dias)	200	175	160	147	144	126
RFAinc (MJ/m <sup>2</sup> )	1620,78	1371,8	1211,63	1078,01	1050,94	894,76

## CONCLUSÃO

O modelo de estimativa do desenvolvimento da soja baseado na temperatura, no fotoperíodo e no fotoperíodo ótimo calibrado, teve um desempenho eficaz, apresentando estimativas precisas para os dados que o determinaram.

O submodelo de estimativa linear segmentado de estimativa do índice de área foliar baseado no modelo de desenvolvimento da soja e nos graus dia acumulados mostrou-se eficiente em simular adequadamente os índices de graus dias necessários para a instalação da cultura e acúmulo de dias fototermais para iniciar R1, R5 e R7.

A eficiência de uso da radiação fotossinteticamente ativa interceptada apresentou variações que indicam a necessidade de estimar o efeito da inclinação solar e da temperatura do ar sobre este coeficiente, parâmetros que no modelo não foram considerados.

A estimativa da massa seca acumulada apresentou variações dentro do mesmo ano agrícola de uma época de semeadura para outra, sendo este ocasionado pelas oscilações na EUR. Apesar de ter ocorrido estas variações a estimativa ficou dentro dos limites esperados por esta cultivar.

O submodelo de distribuição da massa seca aérea acumulada apresentou estimativas precisas até R1, contudo para o período posterior os coeficientes devem ser melhor estimados a partir de uma maior coleta de informações.

As simulações realizadas com diferentes condições ambientais nos mostram que o modelo matemático pode ser utilizado para a região Noroeste do estado do Rio Grande do Sul, pois faz determinações precisas do modelo de acúmulo de massa seca, do submodelo linear segmentado do IAF e do submodelo de partição da massa seca nos componentes folha, caule e vagem, mostrando que os coeficientes estimados podem ser utilizados para o local com outras épocas de plantio diferentes das que se tinham experimentalmente.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADDISCOT, T. M.; WAGENET, R. J. Concepts of solute leaching in soils: A review of modeling approaches. **European Journal of Soil Science**, Hertfordshire, v.36, p.411-424, 1985.

ARAÚJO, G. A. A. et al.. Crescimento e conversão de energia solar em sistemas de cultivo associados e exclusivos de milho e feijão II- feijão das “águas”. **Revista Ceres, Viçosa**, v. 34, p. 42-63, 1987.

ARKEBAUER, T.J.; WEISS, A.; SINCLAIR, T.R. et al. In defense of radiation use efficiency: a response to Demetriades-Shah, T.H., Funchs, M., Kanemasu, E.T. and Flitcroft, I. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, v.68, p.221-7, 1992.

ASSIS, F. N. ; MENDEZ, M. E. G. Relações entre radiação fotossinteticamente ativa e radiação global. **Revista de Pesquisa Agropecuária Brasileira (PAB)**, Brasília, v.24, p.797-800. 1998.

BARIONI, L.G.; VELOSO, R.F.; MARTHA JUNIOR, G.B.. Modelos de tomada de decisão para produtores de ovinos e bovinos de corte. In: EVERLING, D.M. et al.. **Modelos para a tomada de decisão na produção de bovinos e ovinos**, Santa Maria, 2002. Anais. Santa Maria: UFSM, 2002. p. 05-60.

BARNI, N.A.; BERGAMASCHI, H. Alguns princípios técnicos para a semeadura. In: MIYASAKA, S.; MEDINA, J.C. (Ed.) **A soja no Brasil**. Campinas: ITAL, p. 453-685. 1981.

BASSANEZI, R.C. **Ensino-aprendizagem com modelagem matemática: uma nova estratégia**. São Paulo: Contexto, 2002. 389p.

BERGAMASCHI, H. **Fenologia**. Disponível em: <<http://www.google.com.br/search?hl=pt-BR&q=fenologia+homero&meta=>>>. Acesso em: 18 out. 2006.

BOARD, J. E.; TAN, Q.. Crop Ecology, Production & Management: Assimilatory capacity effects on Soybean yield components and pod number. **Crop Science**, v.35, p. 846-851, May-June. 1995.

BONATO, E.R.. **Estresses em Soja**. Passo Fundo: Embrapa trigo, 2000. 253p.

BONHOMME, R. Bases and limits to using 'degree.day' units. **European Journal of Agronomy**, v.13, p.1-10. 2000.

BOOTE, K. J. et al. Peanut crop growth simulation model. **Agricultural Experiment Station Journal**. University of Florida, Gainesville, Florida, U.S.A. User's Guide, n.8420, 1987.

\_\_\_\_\_, GRIMM, S.S., JONES, J.W. and HESKETH, J.D. **Parameter Estimation for Predicting Flowering Date of Soybean Cultivars**, Crop Sci, V.33, p.137-144, jan.-fev.1993.

\_\_\_\_\_. JAGTAP, S.S., JONES, JAMES, J.W., and MISHOE, J.W.. Soybean Developemnt. In: HANKS, J., RITCHIE, J.T.. **Modeling Plant and Soil Systems**. Madison, Wisconsin USA: Agronomy, 1991.

\_\_\_\_\_. et al. **Modeling Dry Weight Gain**. University of Florida, Gainesville, Florida, U.S.A. 1989.

\_\_\_\_\_.; JONES, J. W. PICKERING, N. B.. Potencial uses and limitations of Crop Models. **Agronomy Journal**, v.88, p. 695-697, sept.-oct. 1996.

BRISSON, N. et al. Proposition d'un modèle semi-deterministe pour la culture du maïs-grain: application a la C. E. E. et au territoire français. In: Comission des Communautes des Europeennes. **Evaluations des contraintes sol-climat sur la faisabilité des cultures:**

**applications du maïs grains.** Paris: I.N.R.A. Faculté des Scienses Agronomiques de l'Etat, 1990.

CABELGUENNE, M.; JONES, C. A.; WILLIAMS, J. R. Strategies for limited irrigation of maize in southwestern France - a modeling approach. **Transaction of the ASAE**, v.38, 1995. p.507-511.

CÂMARA, G. M. S.; HEIFFIG, L. S. Fisiologia, ambiente e rendimento da cultura da soja. In: CÂMARA, G. M. S. (coord) **Soja: Tecnologia da Produção II**. Piracicaba: ESALQ/LPV, 2000. p. 81-119.

CAMARGO, M. B. P.; BRUNINI, O.; MIRANDA, M. A. C.. Temperatura-base para cálculo dos graus-dia para cultivares de soja em São Paulo. **Revista de Pesquisa Agropecuária Brasileira (PAB)**, Brasília, v.22, n.2, p.115-121. 1987.

CASTRO, P. R. C.; KLUGE, R. A.. **Ecofisiologia de Cultivos Anuais: Trigo, Milho, Soja, Arroz, Mandioca**. São Paulo: Nobel, 1999. 126p.

COSTA, L. C. **Modelagem e simulação em Agrometeorologia**. Piracicaba, ESALQ, 13 a 18 de jul.1997. X Congresso Brasileiro de Agrometeorologia.

\_\_\_\_\_; CONFALONE A.; PEREIRA, C.R. Effect of water stress on the efficiency of capture of water and radiation by soybean. **Tropical Science**, London, v.39, n.1, p.1-7, 1999.

\_\_\_\_\_; SANTOS, A. A. Análise da Eficiência do Uso da Radiação Solar para as culturas de Milho, Soja, Arroz e Feijão nas diversas regiões nas diversas regiões produtores de Minas Gerais. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 20, n. 3, p. 188-194, set. 2000.

COSTAMILAN, L. M.; BERTAGNOLI, P. F. (org). **Indicações técnicas para a cultura da soja no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina: 2004/2005**. Passo Fundo: EMBRAPA-CNPT, 2004. 172p.

COUTO, M. B.. **Introdução à radiação solar. Apostila não publicada.** Porto Alegre: UFRGS-PRONEX, mar. 1995.

DALLACORT, R. et al. Ajuste e teste dos coeficientes genéticos do modelo de simulação Cropgro-soybean, para a região Noroeste do Estado do Paraná. **Acta Scientiarum Agronomy, Maringá**, v. 27, n. 2, p. 363-371, April-June. 2005.

\_\_\_\_\_. **Simulação da produtividade da cultura da soja, para as condições de solo e clima de Palotina-PR.** Maringá: UEM, 2004. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Universidade Estadual de Maringá, 2004.

DETOMINI, E. R. **Modelagem da Produtividade Potencial de Brachiaria brizantha (Variedades cultivadas Marandú e Xaraés).** Piracicaba: ESALQ/ USP, 2004. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 2004.

DOURADO NETO, D. et al. Principles of crop modeling and Simulation: Uses of mathematical models in model development. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.55, n. esp., p.46-50, ago.1998a.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de soja. **Recomendações técnicas para a cultura da soja na região central do Brasil 1996/97.** Londrina: Embrapa, CNPSo, 1996. 149p. (Documento, 88).

\_\_\_\_\_. Centro de Pesquisa Agropecuária - Sistemas de produção. **Tecnologia de produção da soja, estado do Paraná. Informações Técnicas** – Embrapa, 1998. 195p.

\_\_\_\_\_. **Sistema Brasileiro de Classificação de solos.** Rio de Janeiro: Embrapa, produção de informações, 1999.

FIALHO, F.B. Sistemas de apoio à decisão na produção de suínos e aves. In: Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Zootecnia, 1999, Porto Alegre. **Anais**. Porto Alegre: SBZ, 1999. p. 307-317.

FONTANA, D. C.; OLIVEIRA, D.. Relação entre radiação solar global e insolação para o estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.4, n.1, p. 87-91. 1996.

FRANCISCO, E. A. B. **Antecipação da Adubação da Soja na cultura de Eleusine coracana (L.) Gaertn., em sistema de plantio direto**. Piracicaba: ESALQ/ USP, 2002. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 2002.

FRANÇA, S. et al. Radiação Fotossinteticamente Ativa e sua Relação com a Radiação Solar Global em Dossel de Alfafa, em função do Índice de Área foliar. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.5, n.2, p. 147-153, jul.-dez. 1997.

GOSSE, G. et al. Production maximal de matière sèche et rayonnement solaire intercepté par un couvert vegetal. **Agronomie**, Paris, v. 6, p.47-56, 1986.

GRIMM, S. S. et al.. Parameter Estimation for Predicting Flowering date of Soybean Cultivars. **Crop Science**, v.33, p. 137-144, Jan.-Feb. 1993.

HEEMST, H. D. J. Physiological principles. In: KLEULEN, H. ; WOLF, J. **Modelling of agricultural production: Weather soils and crops**. Wageningen, Pudoc, 1986. p.13-26.

HEALTH, M.; BARNES, R.; MELTCALFE, D. **Forages**. Ames, Iowa University Press, 4ed., 1985. 643p.

HEIFFIG, L. S. et al. Fechamento e Índice de Área Foliar da cultura da Soja em diferentes arranjos espaciais. **Bragantia**, Campinas, v. 65, n. 2, p. 285-295. 2006.

HUNT, R. **Plant growth curves**. The functional approach to plant growth analysis. New York: Edward Arnold, 1982. 249p.

INSTITUTO DE PESQUISAS AGRONÔMICAS. Seção de Ecologia Agrícola. **Atlas Agroclimático do Estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, v.1, 1989.

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

JONES, J.W.; MISHOE, J.W; BOOTE, k.J. **Introduction to Simulation and Modeling**. Gainesville, Florida-RSA, University of Florida. February, 1987.

\_\_\_\_\_; RITCHIE, J.T., Modeling Plant and Soil Systems, **Agronomy Journal**, Madison, n.31, 1991. p.70-89.

\_\_\_\_\_. Decision support sytems for agricultural development. In: PENNING DE VRIES, P. K. T.; METSELLEAR, K. **Systems approaches for agricultural development**. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. The Netherlands, 1993.

LAL, H.; HOOGENBOOM, L. H.; CALIXTE, J. P.; JONES, J. W.; BEINROTH, F.H. Using crop simulation models and GIS for regional productivity analysis. **Transaction of the ASAE**, v.36, 1993. p.175-184

LARCHER, W. **Ecofisiologia Vegetal**.



MARTINS, M. C. et al.. Épocas de Semeadura, densidades de plantas e desempenho vegetativo de cultivares de soja. *Scientia Agrícola*, Piracicaba, v.56, n.4, out.-dez. 1999.

MARCHESAN, C. F. **Elaboração do Rendimento da cultura da soja (*Glycine Max*): Efeito de datas de sementeira e do espaçamento entre linhas**. Ijuí: UNIJUÍ, 2005. Monografia (Graduação em Agronomia), Departamento de Estudos Agrários, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, 2005.

MAYERS, J. D.; LAWN, R. J.; BYTH, D. E.. Agronomic studies on soybean (*Glycine max (L.) Merrill*) in the dry seasons of the tropics. In: **Limits to yield imposed by phenology**. Australian Journal of Agricultural Research, East Melbourne. V. 42, n.7, 1991. p.1075-1092.

MEDEIROS, H. R. **Avaliação de Modelos Matemáticos Desenvolvidos para auxiliar a tomada de Decisão em Sistemas de Produção de Ruminantes em Pastagens**. Piracicaba: ESALQ/ USP, 2003. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 2003.

MELO, R. W.. **Parametrização de modelo para a estimação da produtividade de soja nas regiões do Planalto Médio, das Missões e do Vale do Uruguai, do Rio Grande do Sul**. Piracicaba: ESALQ/ USP, 2005. Tese (Doutorado em Agronomia), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 2005.

MIGLIOTANZA, E. **Modelo Matemático-Fisiológico para simular o crescimento e a produtividade da cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris L.*)**. Viçosa: UFV, 1992. Tese (Doutorado em Fitotecnia), Universidade Federal de Viçosa, 1992.

MIRANDA, M. A. C.; MYASAKA, S.; MASCARENHAS, H. A. A.. Melhoramento da soja no Estado de São Paulo. In: Myasaka, S.; MEDINA, J. C. **A soja no Brasil**. Campinas: Fundação Cargill, 1981. p.73-108.

MOTA, F. S. Condições climáticas e produção de soja no sul do Brasil. In: Verneti, F. J. (coord.). **Soja: planta, clima, pragas, moléstias e invasoras**. Campinas: Fundação Cargil, 1983. p. 91-126.

MONTEITH, J. L. Climate and the efficiency of crop production in Britain. **Philosophy Transaction, London**, v.282, n.1, p.277-294, 1977.

\_\_\_\_\_. Does light limit crop production? In: Johnson, C. B. (ed.), **Physiological processes limiting plant productivity**. Butterworths, London, 1981. p. 23-28.

\_\_\_\_\_. The quest for balance in crop modeling. **Agronomy Journal**, Madison, WI, v.88, p. 695-697. 1996.

\_\_\_\_\_. Epilogue: Themes and variation. **Plant Soil**, v. 58, p.305-309. 1981.

MUCHOW, R. C. An analysis of the effects of water deficits on grains legumes grown in a semi-arid tropical environment in terms of radiation interception and its use. **Field Crops Research**, Amsterdã, v.11, n. 4, p. 309-323, set. 1985.

\_\_\_\_\_; 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.

MÜLLER, A. G.. **Modelagem e elaboração do rendimento do milho (Zea mays L.) frente a condições de deficiência hídrica**. Porto Alegre: UFRGS, 2001. Tese (Doutorado em Agronomia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.

NAKAGAWA, J.; ROSOLEM, C.A.; MACHADO, J.R. Épocas de semeadura da soja: I. Efeitos na produção de grãos e nos componentes da produção. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.18, n.11, p.1187-1198. 1983.

NAKASEKO, N.; GOTOH K. Comparative studies on dry matter production, plant type and productivity in soybean, azuki bean, and Kidney bean. **Japan Journal Crop Science**, Tokyo, v.52, p.49-58. 1983.

NAVARRO, H. M. J. Expressão do potencial de rendimento de cultivares de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.37, n.3, p.275-279, mar. 2002.

NEUMAIER, N. et al. Estádios de desenvolvimento da cultura da soja. In: BONATO, E.R.. **Estresses em Soja**. Passo Fundo: Embrapa trigo, 2000. 253p.

PASSIOURA, J. B. Sense and nonsense in crop simulation. **Journal Aust**, v.39, p. 181-183. 1973.

PENNING DE VRIES, P. K. T. et al. Systems simulation at IRRI. **IRRI Research Paper**. Série, 151, IRRI, Manila, Philippines, 1991.

\_\_\_\_\_ ; SPITTERS, C. J. T. The potencial for improvement in crop yield simulation. In: MUCHOW, R. C.; BELLAMY, J. A. (ed). **Climate riak in crop production: models and management for the semiarid tropics and subtropics**. CAB Internacional, Wallingford, 1991. p. 123-140.

PEREIRA, A. R.; MACHADO, E.C.; CAMARGO, M. B. P. Solar Radiation regime in three cassava (*Manihot esculenta* Crantz) canopies. **Agric. Meteorol**. Amsterdam, v.36, p.1-10, 1982.

\_\_\_\_\_ ; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C.. **Agrometeorologia: Fundamentos e Aplicações Práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478p.

\_\_\_\_\_ ; MACHADO, E.C. **Análise quantitativa do crescimento de comunidade vegetal**. Campinas: Instituto Agrônômico, 1987. 33p. (Boletim Técnico, 114).

PICARD, D. Conclusion. In: COMBE, L. PICARD, D. **Élaboration du rendement des principales cultures annuelles**. Paris: Institut National de LA Recherche Agronomique, 1994. 191p.

PIMENTA, H. S. et al. Modelo Matemático para estimar o acúmulo de matéria seca e prever as épocas do florescimento e do ponto de maturidade fisiológica da cultura do feijão. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.56, n. 4, oct.-dec. 1999.

PLÁ, G.P.; LOPES, N.F. Estimativa de Crescimento e Produtividade do Feijoeiro pela utilização de Modelo Matemático-Fisiológico. **Revista de Pesquisa Agropecuária Brasileira (PAB)**, Brasília, v.38, n.8, ago.1998.

PORTO, R.E. et al. **Modelos e a Simulação por computador na Biologia**. Apostila não publicada, Campinas: 30 de julho de 2000.

PROCÓPIO, S. O. et al. Desenvolvimento foliar das culturas da soja e do feijão e de plantas daninhas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.33, n.2, p. 207-211, mar.-abr. 2003.

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

RESENDE, M.; HENDERSON, D. W.; FERERES, E.. Freqüência de irrigação desenvolvimento e produção de feijão Kidney. **Revista de Pesquisa Agropecuária Brasileira (PAB)**, Brasília, v.16, n.3, maio-jun. 1981.

\_\_\_\_\_. Clima do solo: suas relações com o ambiente agrícola. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 12, n. 138, p. 43-59. 1986.

RICHARDS, F.J. The quantitative analysis of growth. In: STERWARDS, F.C. (Ed.). **Plant physiology: a treatise**. New York: Academic Press, v.1, p.3-76, 1969.

RITCHIE, S.W.; HANWAY, J.J.; THOMPSON, H.E.; BENSON, G. O. **How a soybean plant develops**. Ames: Iowa State University of Science and Technology, Cooperative Extension Service, 1994. 20p. (Special Report, 53).

RITCHIE, J. T. Wheat phasic development. In: Hanks, J.; RITCHIE, J. T. (ed.). **Modeling plant and soil systems**. Madison, WI: ASA, CSSSA, SSSA, 1991. p. 31-54. (Agronomy Monogr 31).

RODRIGUES, O. et al.. Resposta quantitativa do florescimento da soja à temperatura e ao fotoperíodo. **Revista de Pesquisa Agropecuária Brasileira (PAB)**, Brasília, v.36, n.3, p. 431-437, mar. 2001.

\_\_\_\_\_. Modeling plant and soil systems. **Agronomy Journal**, v.31, p.31-54.

RUSSEL, G.; JARVIS, P.G; MONTEITH, J.L. Absortion by canopies and stand growth. In: RUSSEL,G., MARSHALL, B., JARVIS, P.G. (Eds.) **Plant canopies: their growth, form and funtion**. Cambrige: Cambrige University Press, 1989. p.21-39.

SANTOS, A. C. K. et al. **Modelagem Computacional utilizando Stella: Considerações teóricas e aplicações em gerenciamento, física e ecologia de sistemas**. Editora da Furg, Rio Grande, 2002. 138p.

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

\_\_\_\_\_. Relação entre a soma térmica efetiva e o crescimento da soja. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.10, n.1, p. 89-96, jan.-jun. 2002.

SQUIRE, G.R.; MARSHALL, B.; TERRY, A.C. et al. Response to temperature in a stand of pearl millet.VI. Light interception and drymatter production. **Journal of Experimental Botany**, Wellesbourne, v.35, p.599-610,1984.

COBER, E. R.; STEWART, D. W.; VOLDENG, H. D.. **Photoperiod and temperature responses in Early-Maturing, Near-Isogenic Soybean Lines**. Disponível em: <<http://www.crop.scijournals.org/cgi/content/full/41/3/721>>. Acesso em: 10 dez. 2006.

STONE, L. F. ; PORTES, T. A.; MOREIRA, J. A. A. Efeitos da tensão de água do solo sobre a produtividade e crescimento do feijoeiro II. Crescimento. **Revista de Pesquisa Agropecuária Brasileira (PAB)**, Brasília, v.23, n.5, p. 503-510, maio, 1998.

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

WARREN, J.W. Maximum yield potential. In: transition from extensive or intensive agriculture with, fertilizers. In: **Coloquium International Potash Institute**, 7., Berne: IPI, 1971. p.105-115.

KVET, J.; ONDOC, J.P.; NECAS, J.; JARVIS, P.G. Methods of growth analysis. In: SESTAK, Z.; CATSKY, J.; JARVIS, P.G. (Eds.). **Plant photosynthetic production: manual of methods**. The Hague: Dr. W. Junk N.W. Pub, 1971. p.343-391.

ANEXO

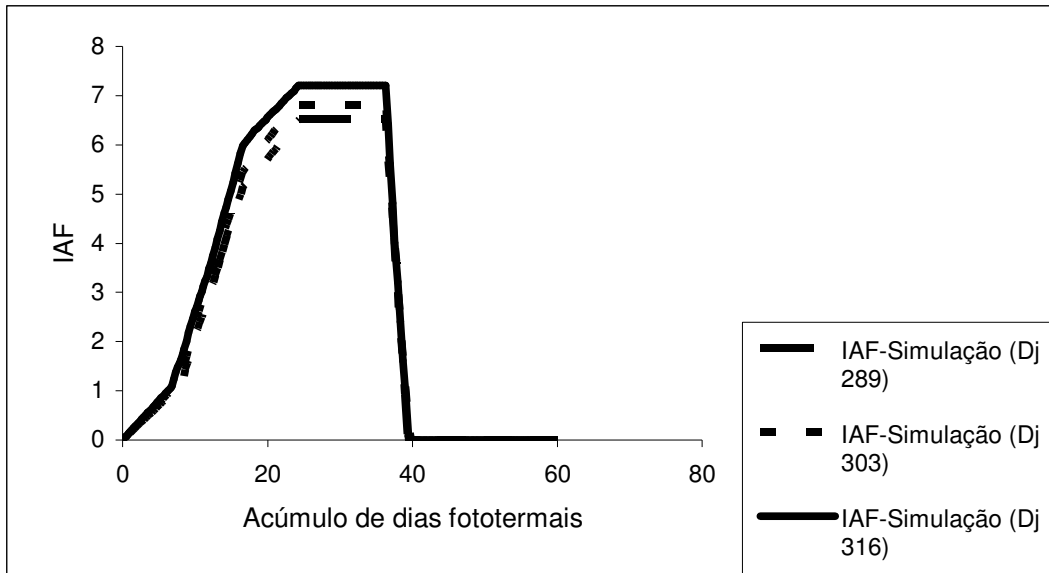
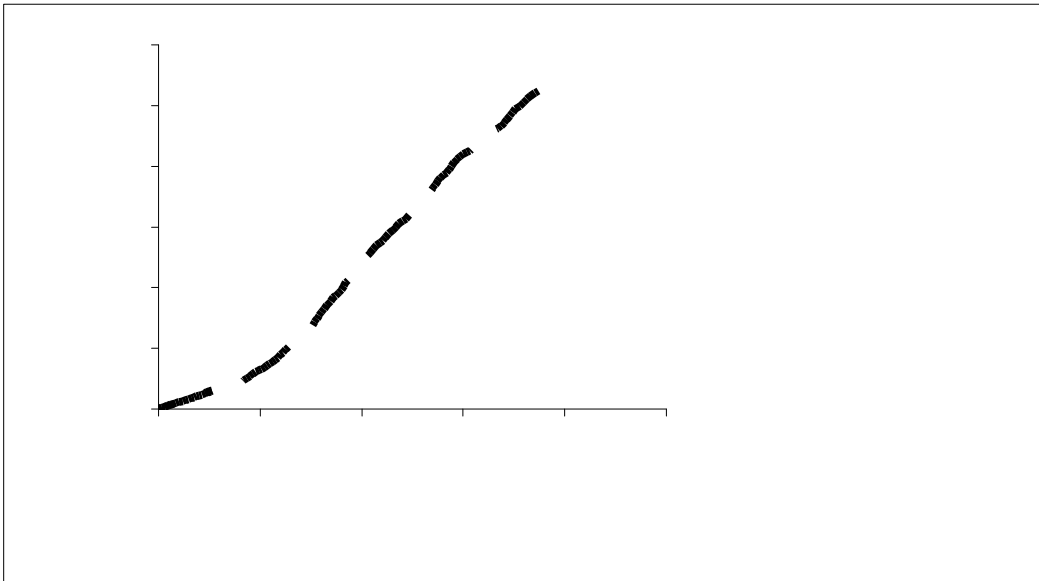


Figura 1 – Simulação no modelo matemático de 2004/05 do IAF da soja da variedade IAS 5 utilizando outras épocas de semeadura.





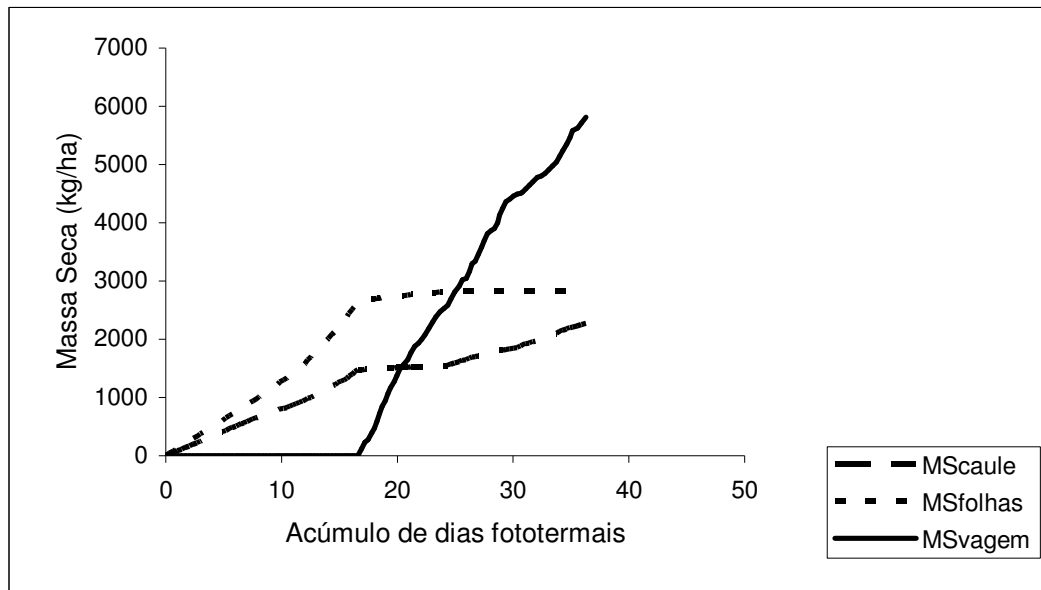


Figura 3 - Simulação no modelo matemático de 2004/05 da Distribuição Massa seca acumulada pela parte aérea da cultura da soja da variedade IAS 5 na semeadura aos 289 Dias Julianos.

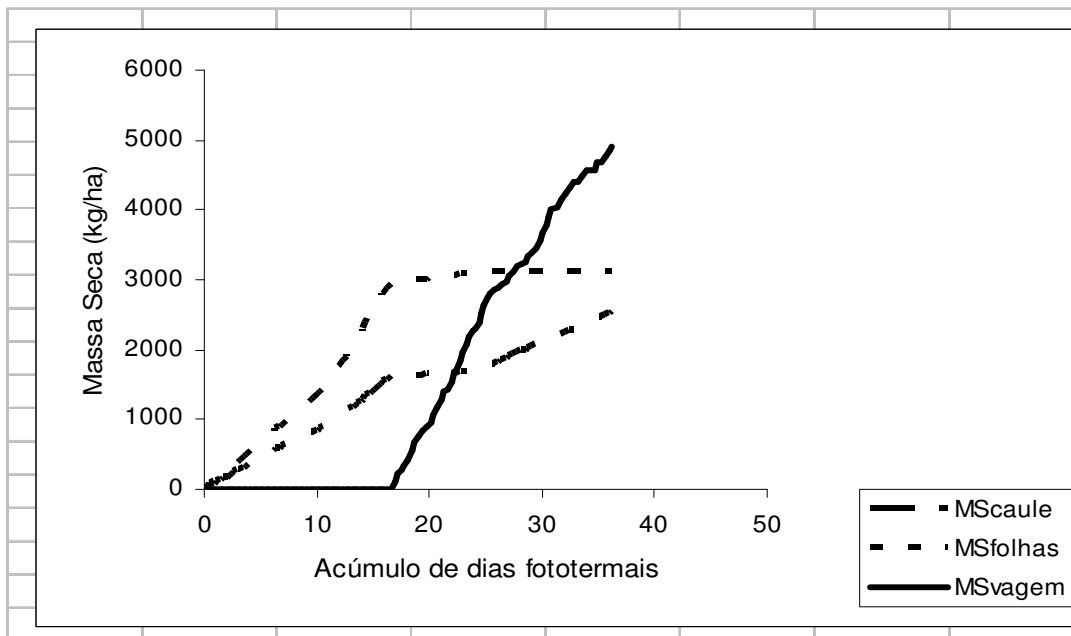


Figura 4 - Simulação no modelo matemático de 2004/05 da Distribuição Massa Seca Acumulada pela parte aérea da cultura da soja da variedade IAS 5 na semeadura aos 303 Dias Julianos.

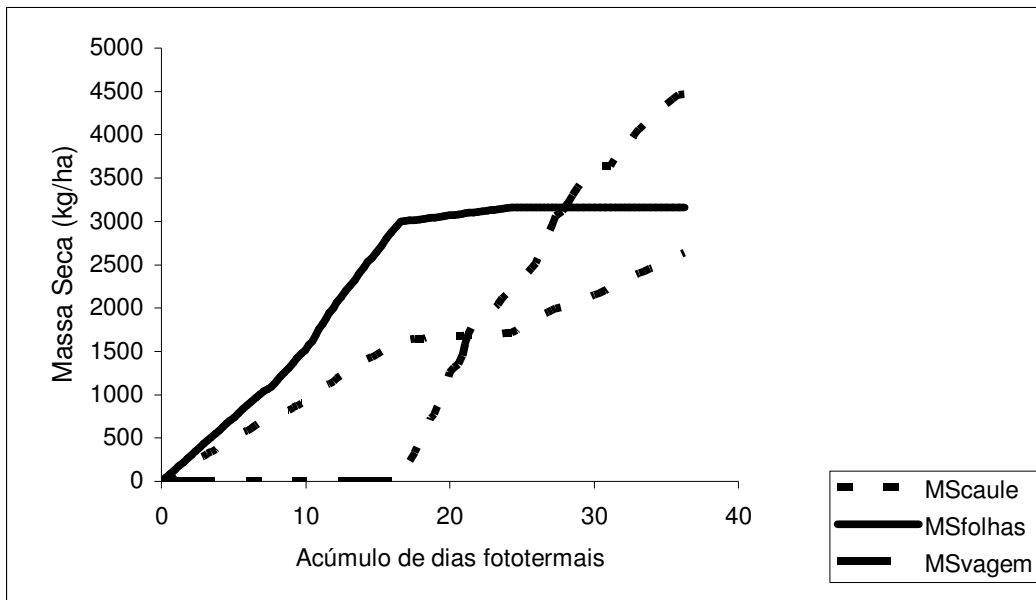


Figura 5 - Simulação no modelo matemático de 2004/05 da Distribuição Massa seca acumulada pela parte aérea da cultura da soja da variedade IAS 5 da semeadura aos 316 Dias Julianos.

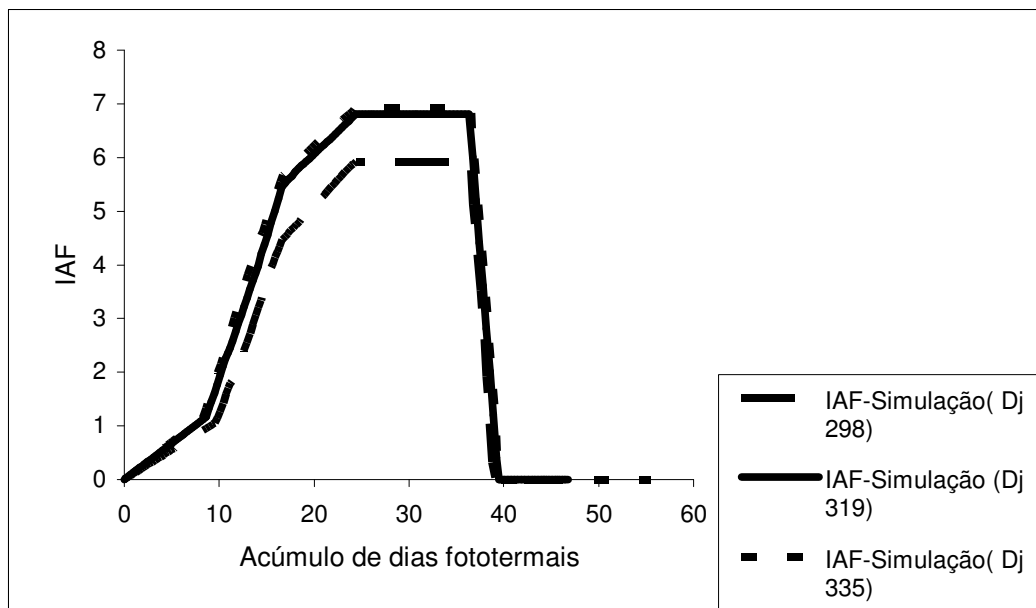


Figura 6 – Simulação no modelo matemático de 2005/06 do IAF da soja da variedade IAS 5 utilizando outras datas de semeadura.

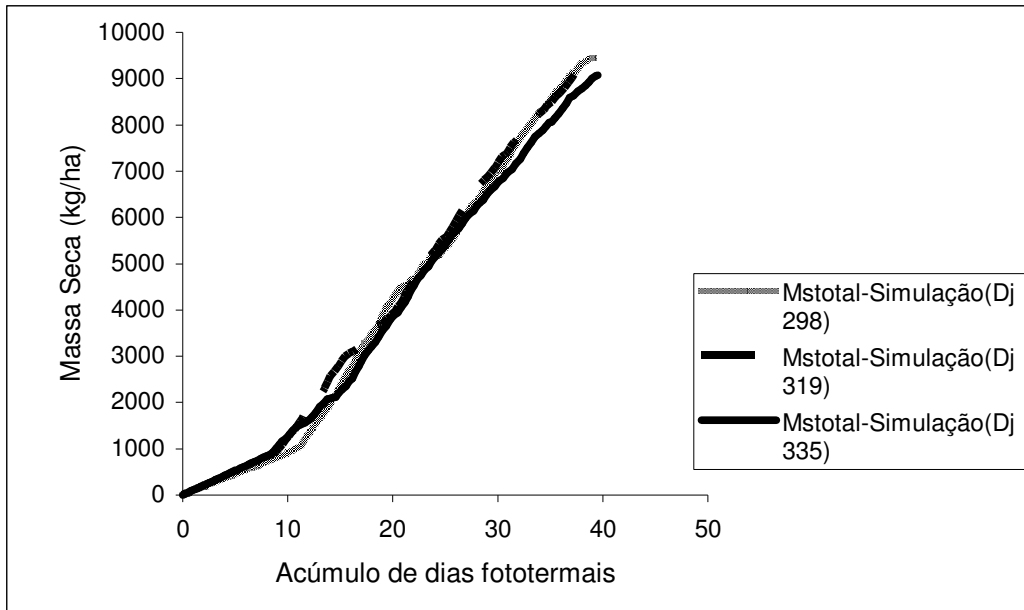


Figura 7 - Simulação no modelo matemático de 2005/06 da Massa seca acumulada pela parte aérea da cultura da soja da variedade IAS 5 utilizando outras datas de semeadura.

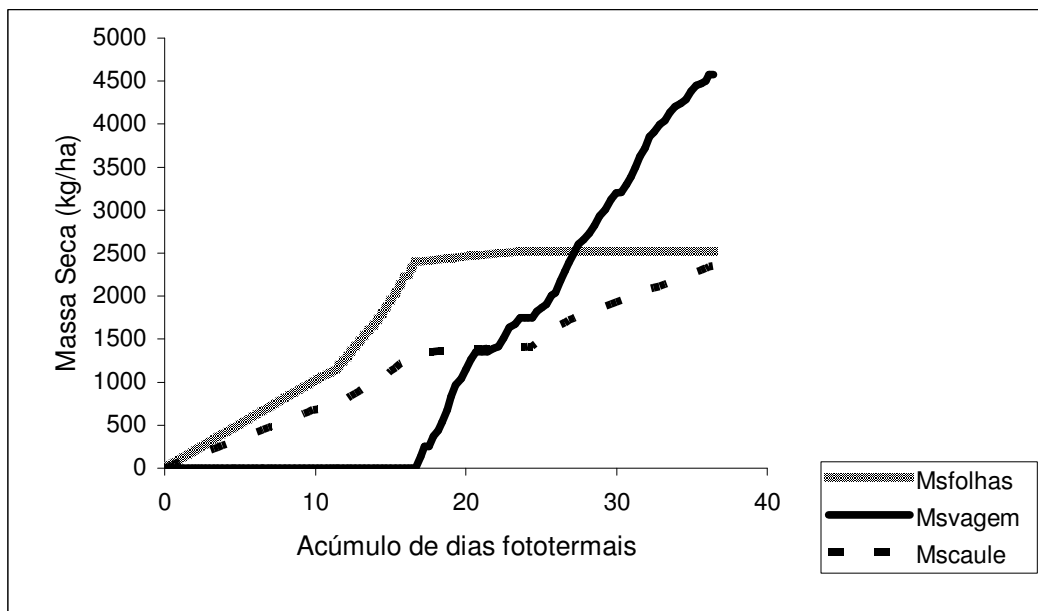


Figura 8 - Simulação no modelo matemático de 2005/06 da Distribuição da Massa seca acumulada pela parte aérea da cultura da soja da variedade IAS 5 na semeadura aos 298 Dias Julianos.

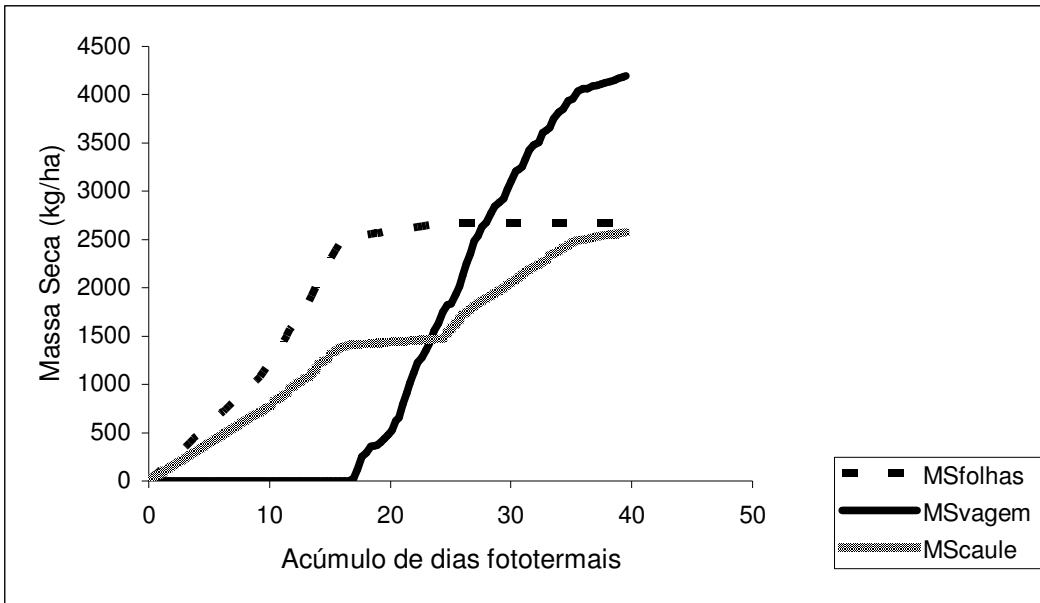


Figura 9 - Simulação no modelo matemático de 2005/06 da Distribuição da Massa Seca Acumulada pela parte aérea da cultura da soja da variedade IAS 5 na semeadura aos 319 Dias Julianos.

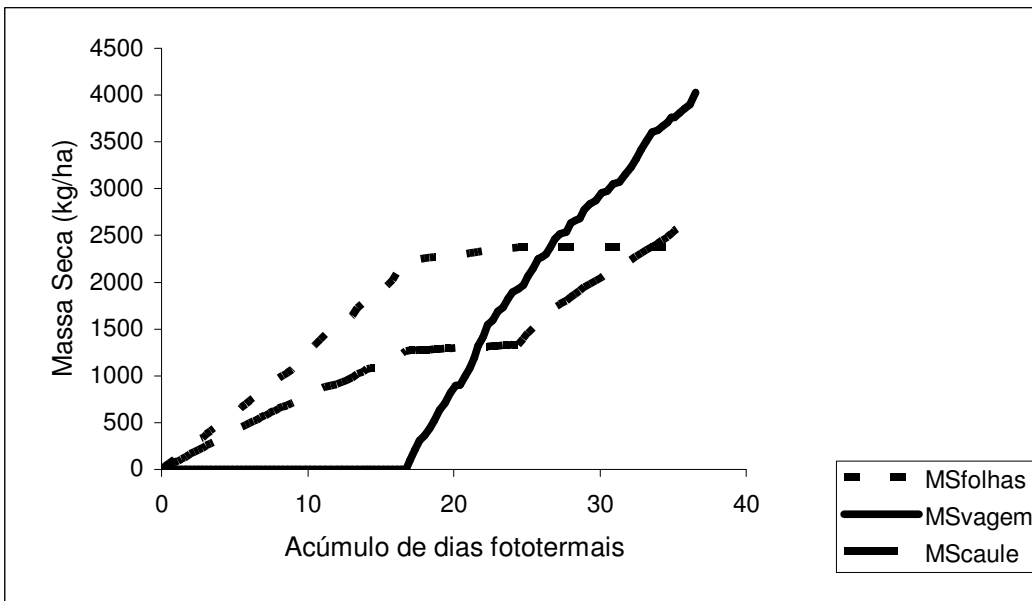


Figura 10 - Simulação no modelo matemático de 2005/06 da Distribuição da Massa Seca Acumulada pela parte aérea da cultura da soja na semeadura aos 335 Dias Julianos.

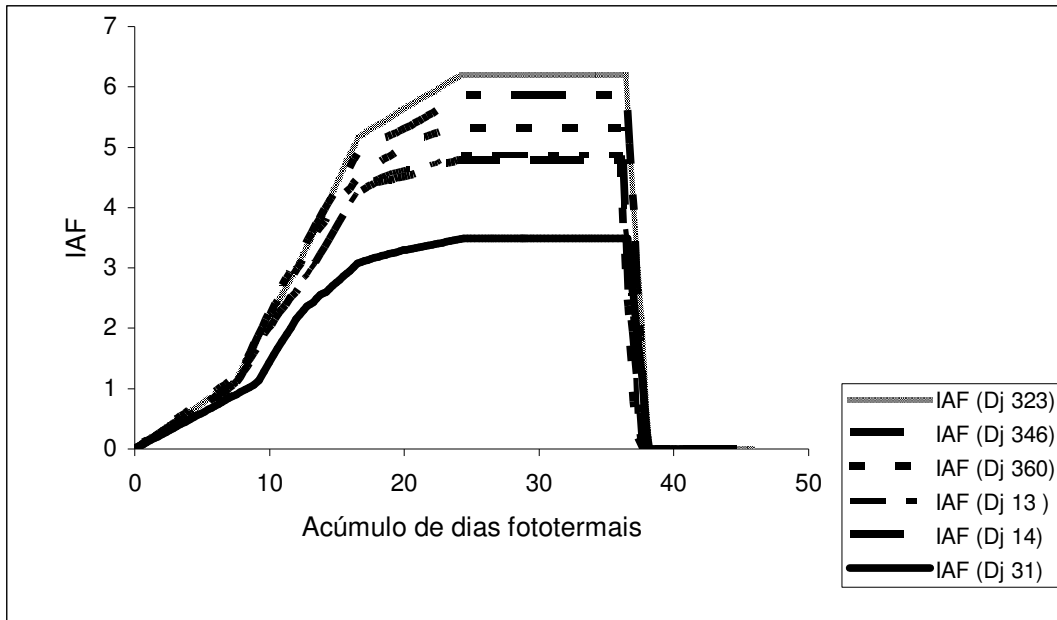


Figura 11 - Simulação do IAF da soja da variedade IAS 5 no ano agrícola de 1981/82.

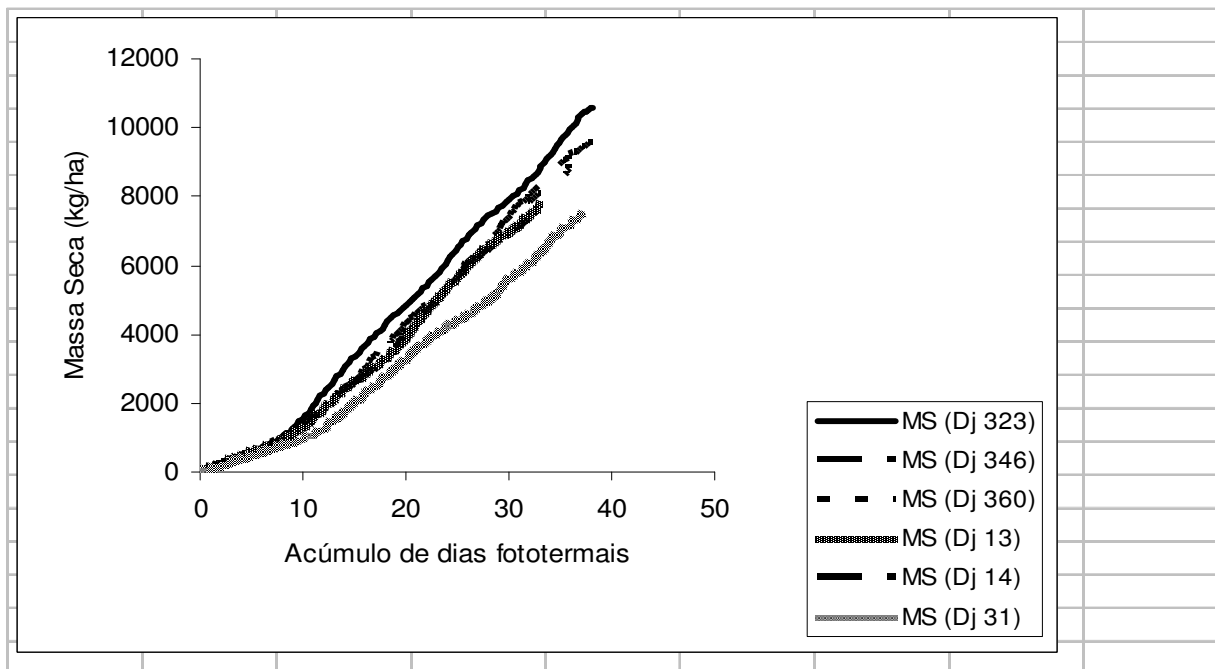


Figura 12 - Simulação da Massa Seca Acumulada pela parte aérea da cultura da soja da variedade IAS 5 no ano agrícola de 1981/82.

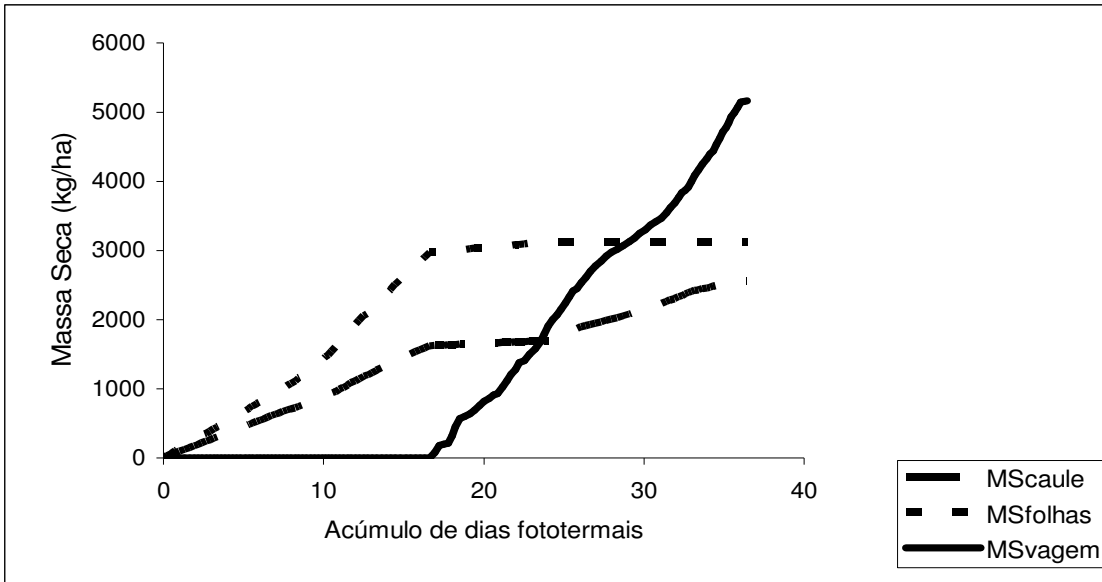


Figura 13- Simulação da Distribuição da Massa Seca Acumulada pela parte área da cultura da soja da variedade IAS 5 na semeadura aos 323 Dias Julianos do ano agrícola de 1981/82.

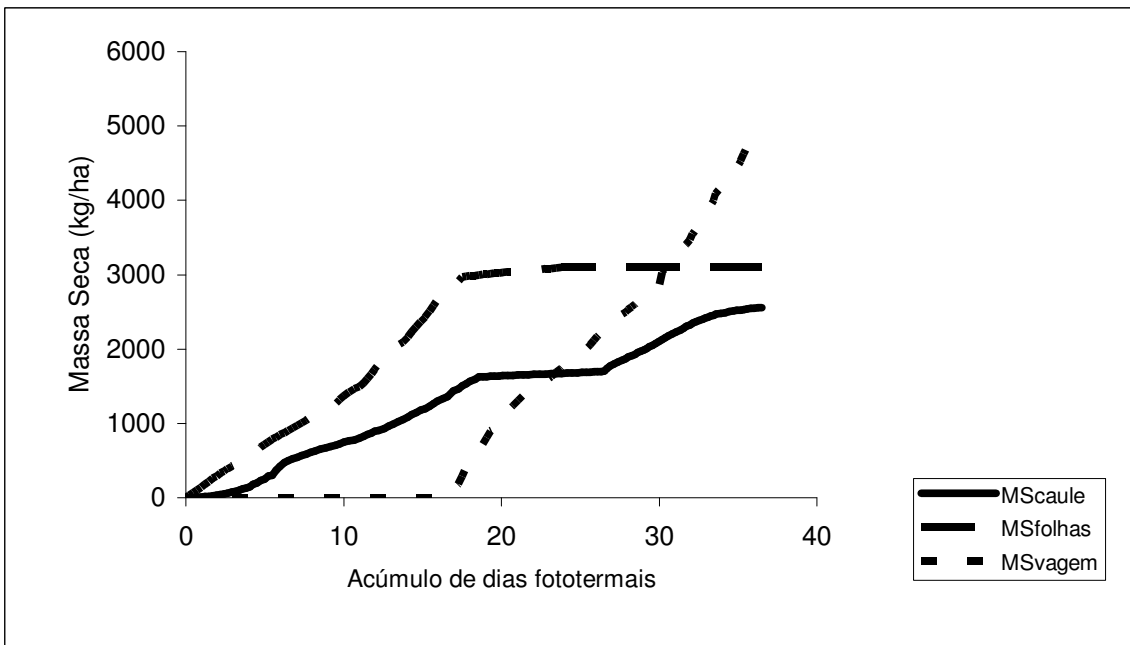


Figura 14- Simulação da Distribuição da Massa Seca Acumulada pela parte área da cultura da soja na semeadura aos 346 Dias Julianos do ano agrícola de 1981/82.

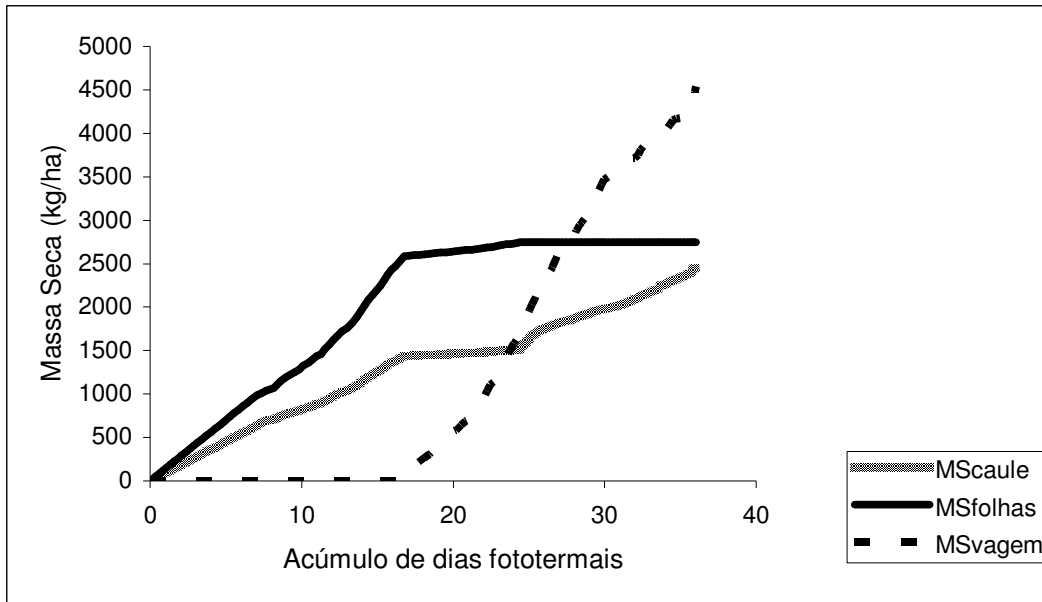


Figura 15- Simulação da Distribuição da Massa Seca Acumulada pela parte área da cultura da soja da variedade IAS 5 na semeadura aos 360 Dias Julianos do ano agrícola de 1981/82.

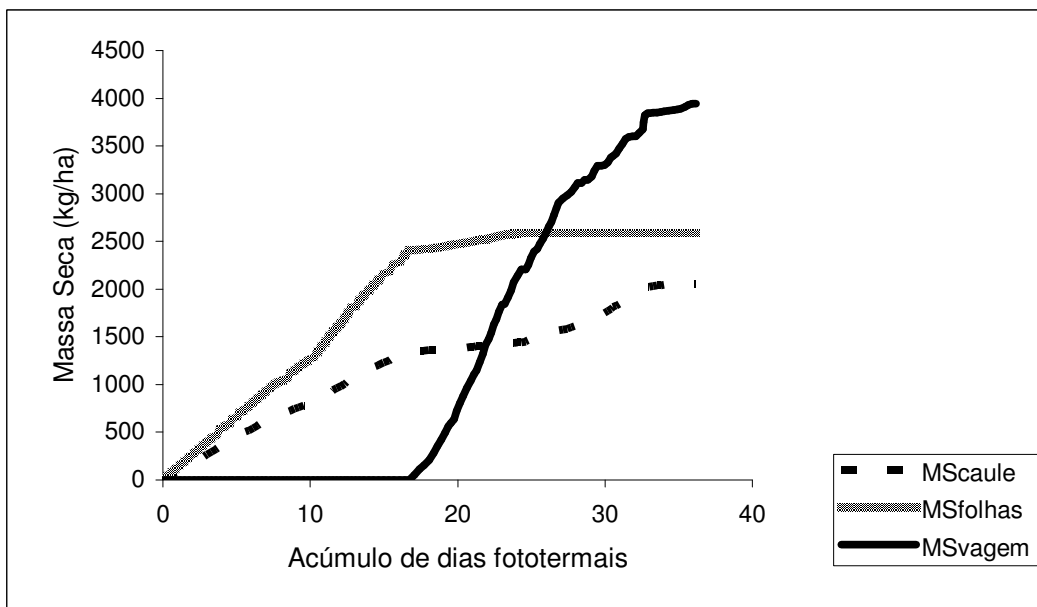


Figura 16 - Simulação da Distribuição da Massa Seca Acumulada pela parte área da cultura da soja na semeadura aos 13 Dias Julianos do ano agrícola de 1981/82.

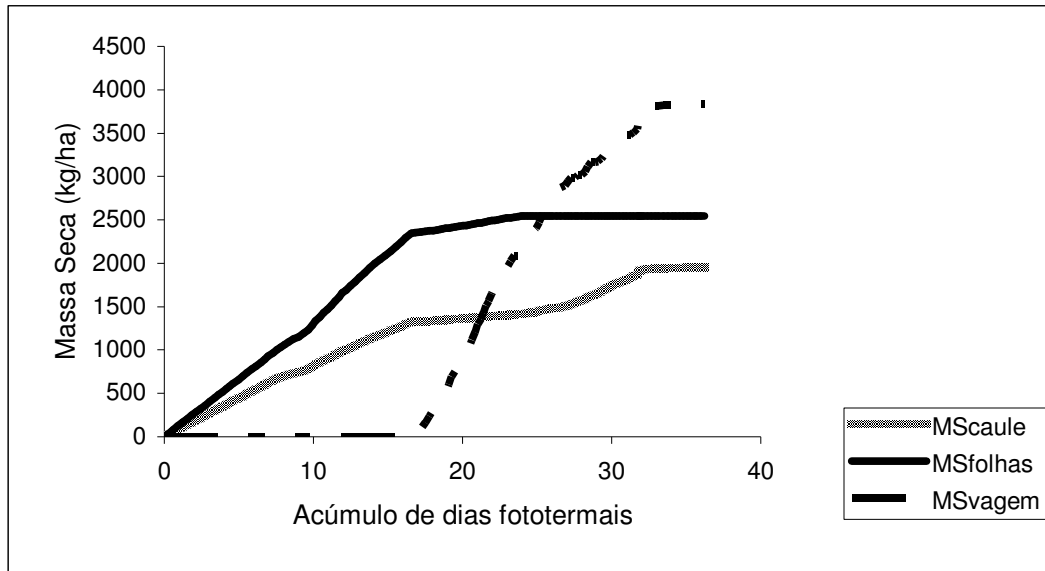


Figura 17 - Simulação da Distribuição da Massa Seca Acumulada pela parte área da cultura da soja da variedade IAS 5 na semeadura aos 14 Dias Julianos do ano agrícola de 1981/82.

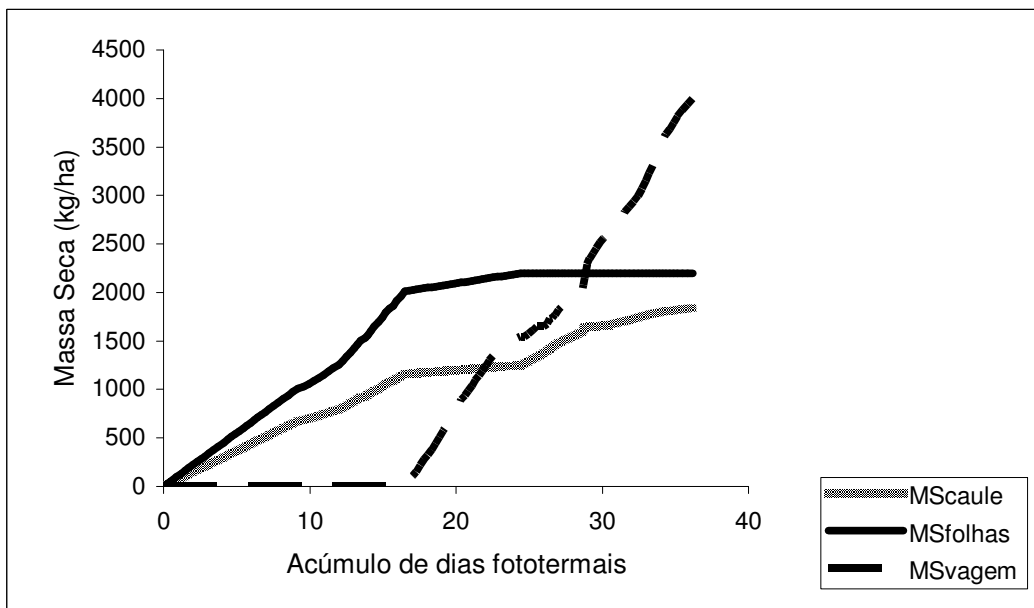


Figura 18 - Simulação da Distribuição da Massa Seca Acumulada pela parte área da cultura da soja da variedade IAS 5 na semeadura aos 31 Dias Julianos do ano agrícola de 1981/82.



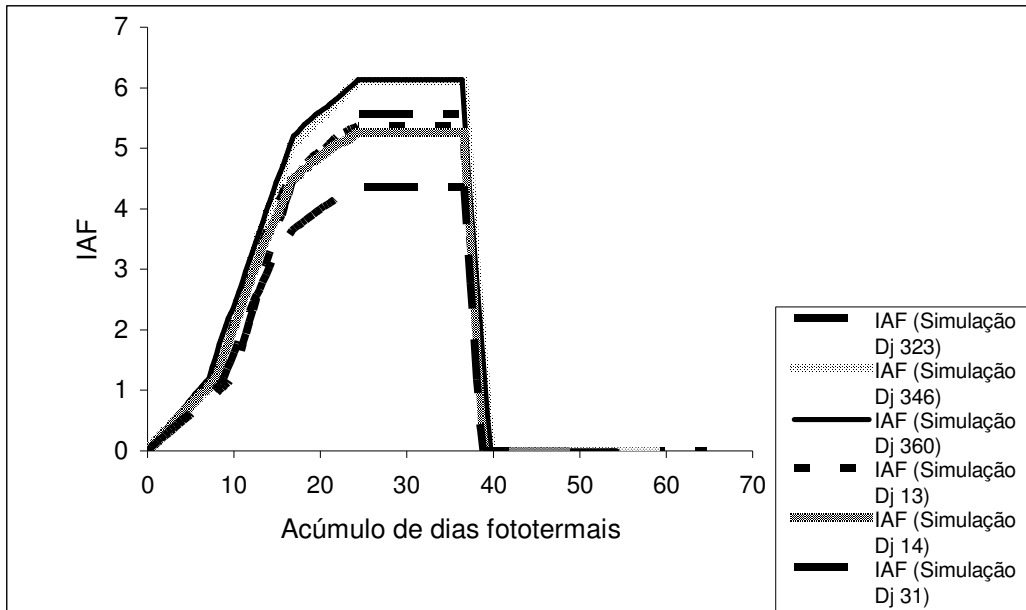


Figura 19 - Simulação do IAF da soja da variedade IAS 5 no ano agrícola de 1982/83.

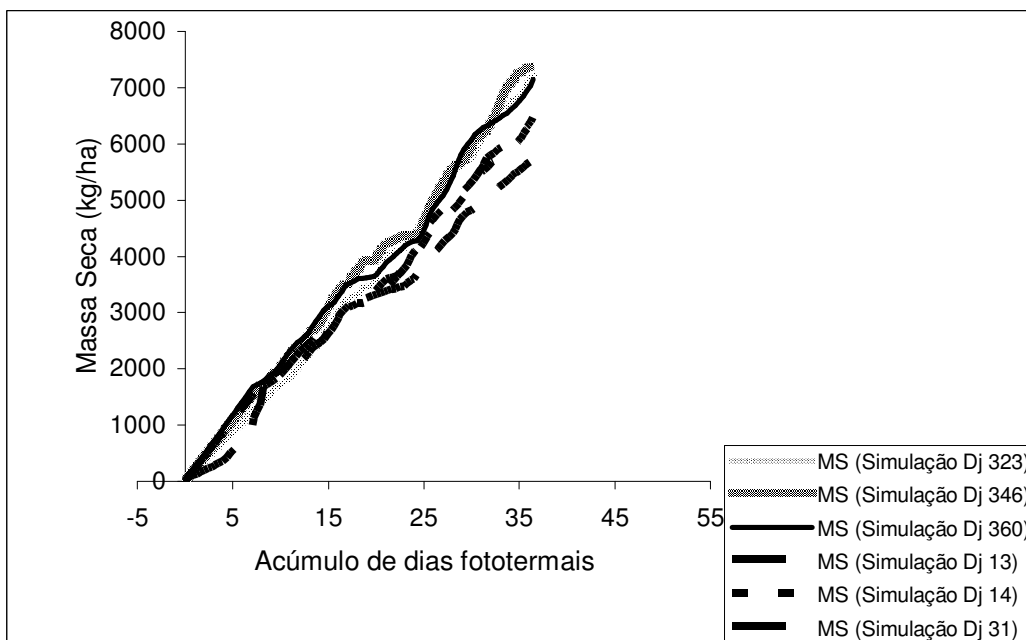


Figura 20 - Simulação da Massa Seca Acumulada pela parte aérea da cultura da soja da variedade IAS 5 no ano agrícola de 1982/83.

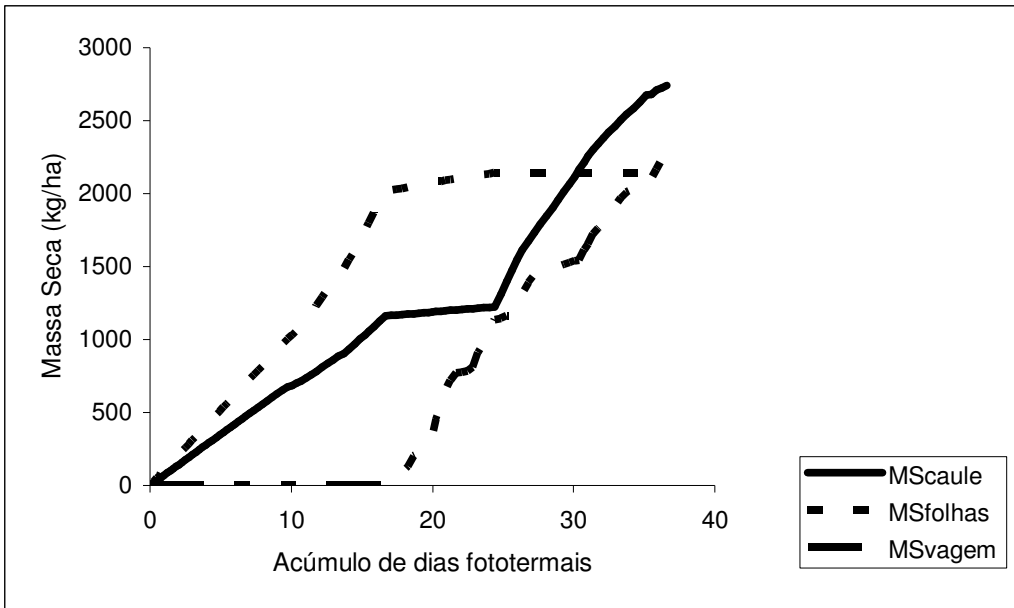


Figura 21 - Simulação da Distribuição da Massa Seca Acumulada pela parte área da cultura da soja na semeadura aos 323 Dias Julianos do ano agrícola de 1982/83.

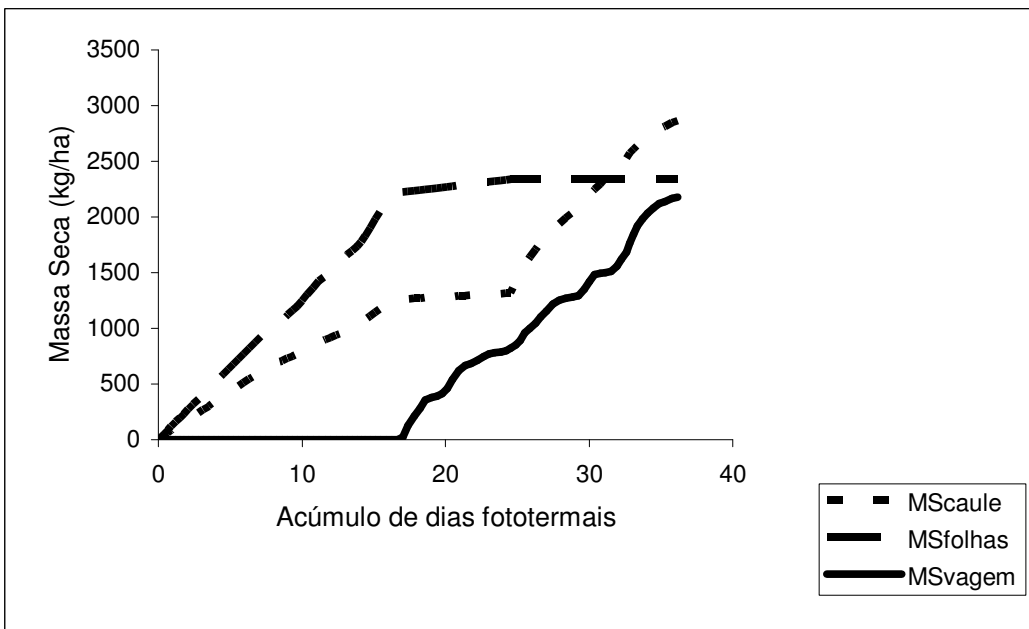


Figura 22 - Simulação da Distribuição da Massa Seca Acumulada pela parte área da cultura da soja na semeadura aos 346 Dias Julianos do ano agrícola de 1982/83.

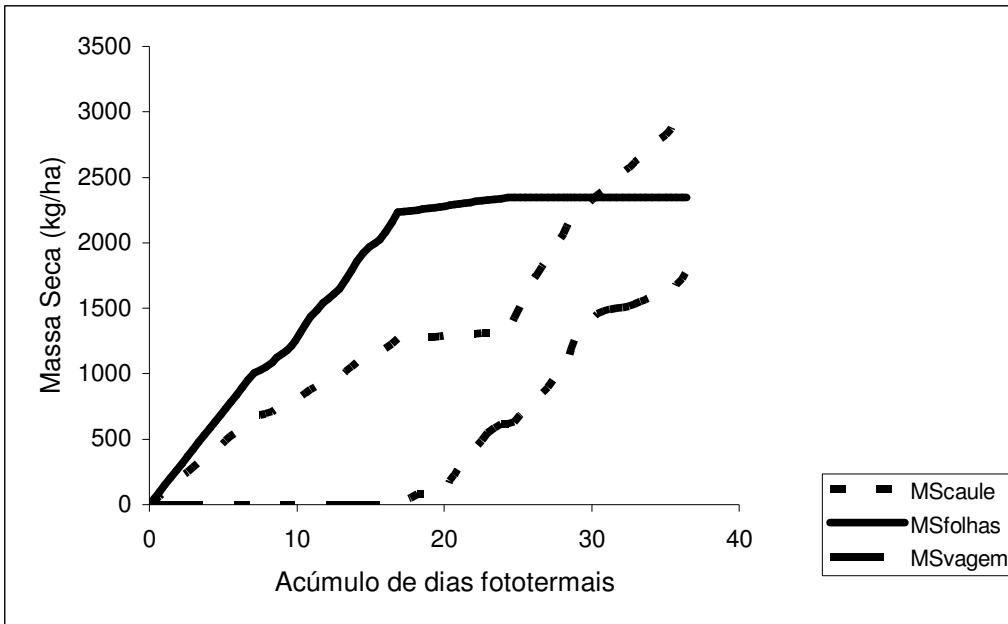


Figura 23 - Simulação da Distribuição da Massa Seca Acumulada pela parte área da cultura da soja na semeadura aos 360 Dias Julianos do ano agrícola de 1982/83.

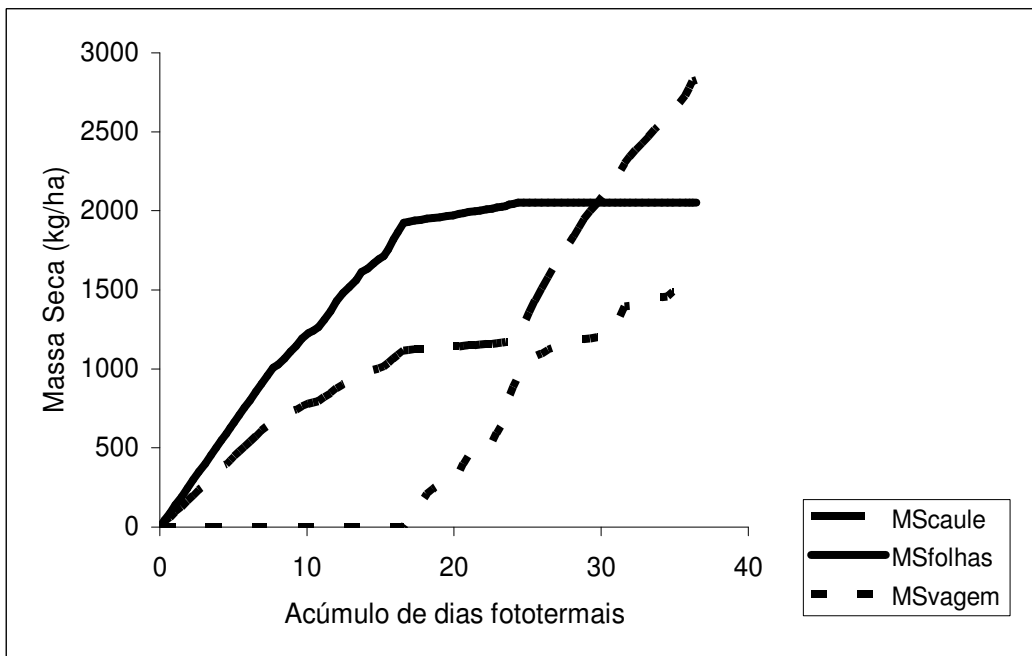


Figura 24 - Simulação da Distribuição da Massa Seca Acumulada pela parte área da cultura da soja na semeadura aos 13 Dias Julianos do ano agrícola de 1982/83.

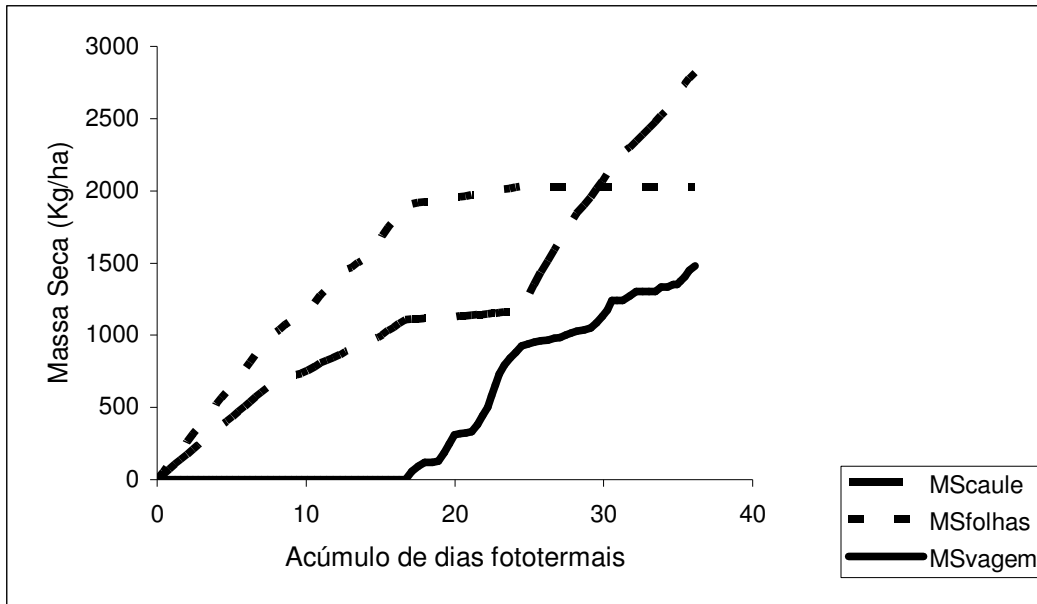


Figura 25 - Simulação da Distribuição da Massa Seca Acumulada pela parte área da cultura da soja na semeadura aos 14 Dias Julianos do ano agrícola de 1982/83.

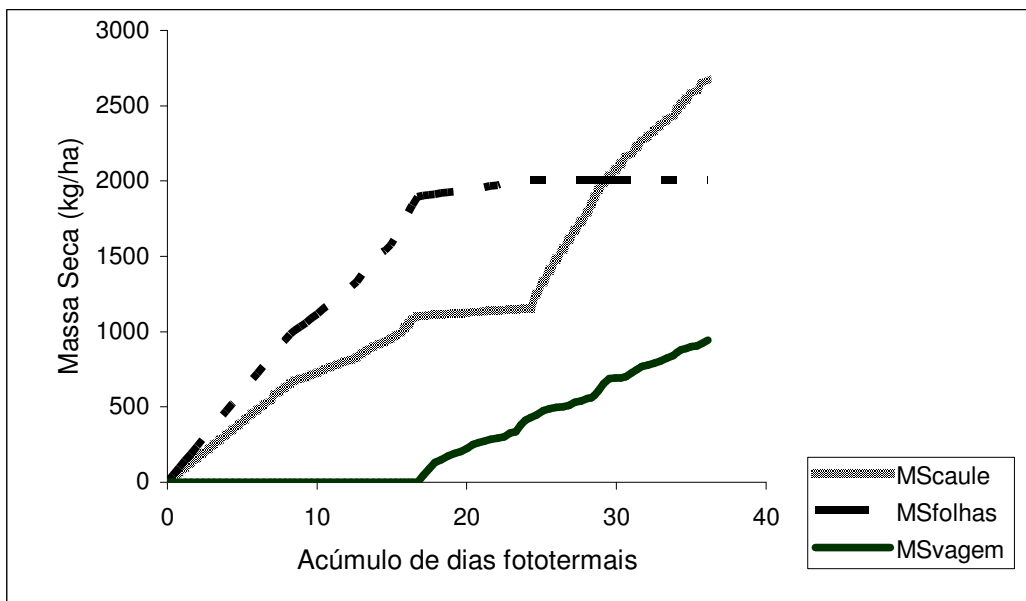


Figura 26 - Simulação da Distribuição da Massa Seca Acumulada pela parte área da cultura da soja na semeadura aos 31 Dias Julianos do ano agrícola de 1982/83.

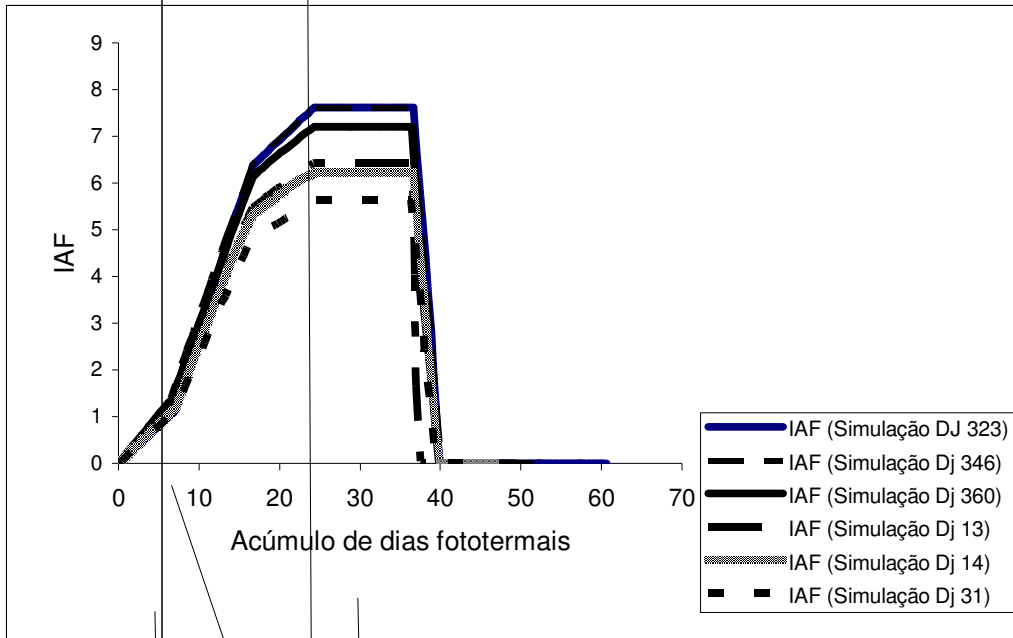
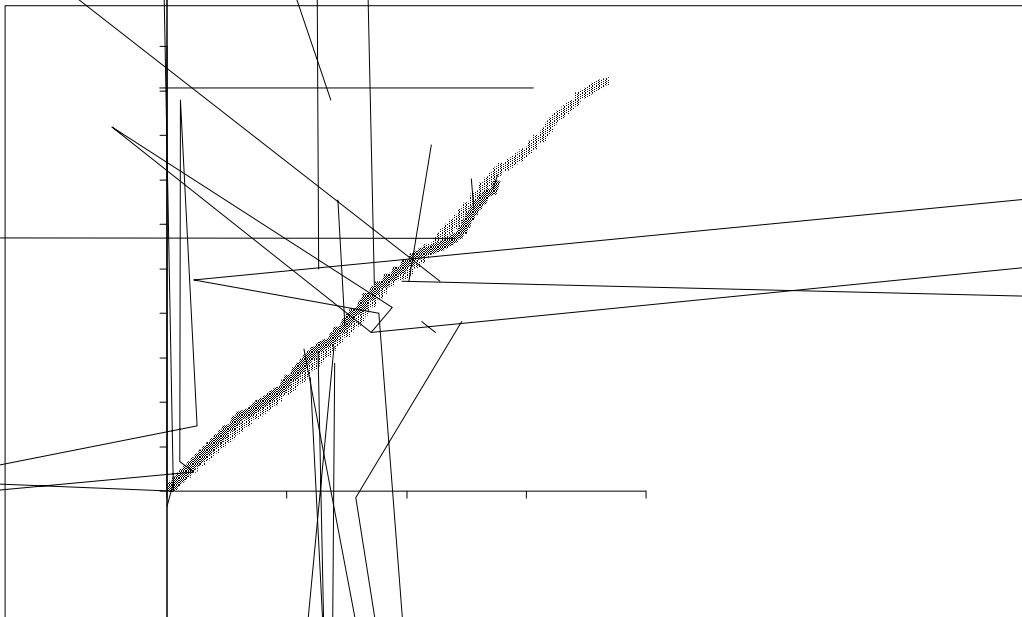


Figura 27- Simulação do IAF da soja da variedade IAS 5 no ano agrícola de 1983/84.



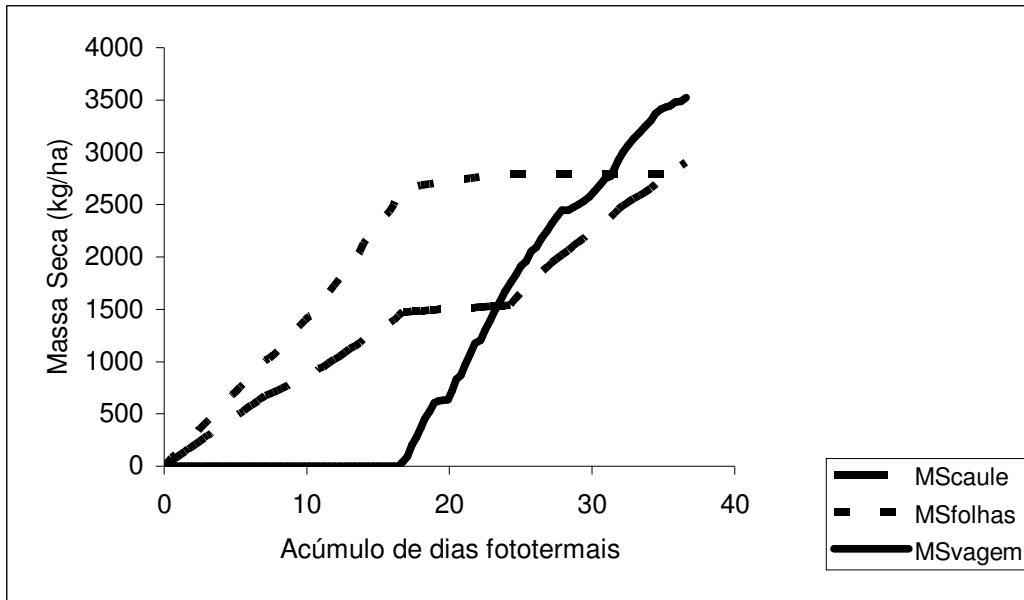


Figura 29 - Simulação da Distribuição da Massa Seca Acumulada pela parte área da cultura da soja na semeadura aos 323 Dias Julianos do ano agrícola de 1983/84.

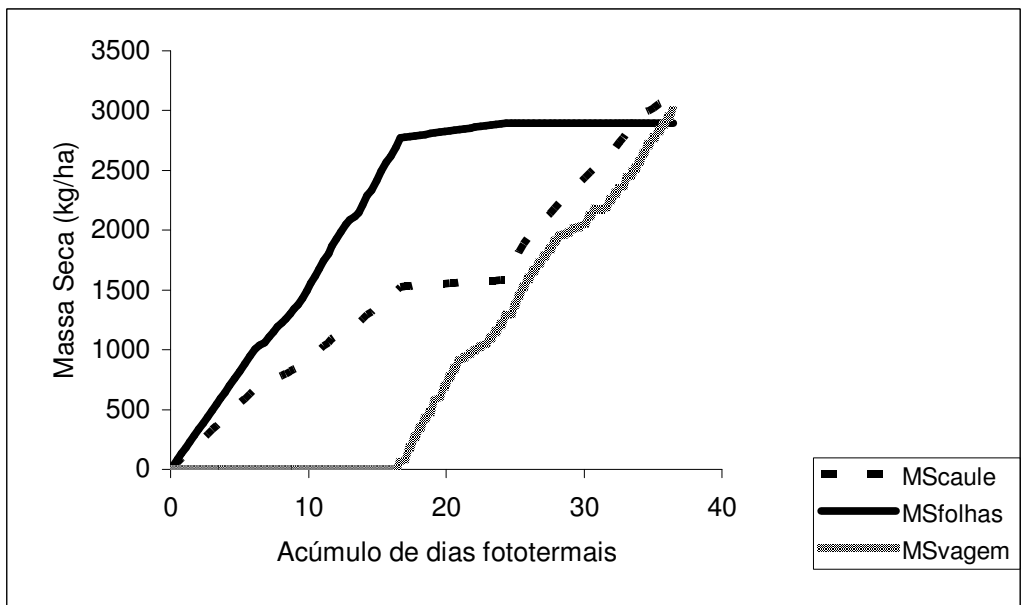


Figura 30 - Simulação da Distribuição da Massa Seca Acumulada pela parte área da cultura da soja na semeadura aos 356 Dias Julianos do ano agrícola de 1983/84.

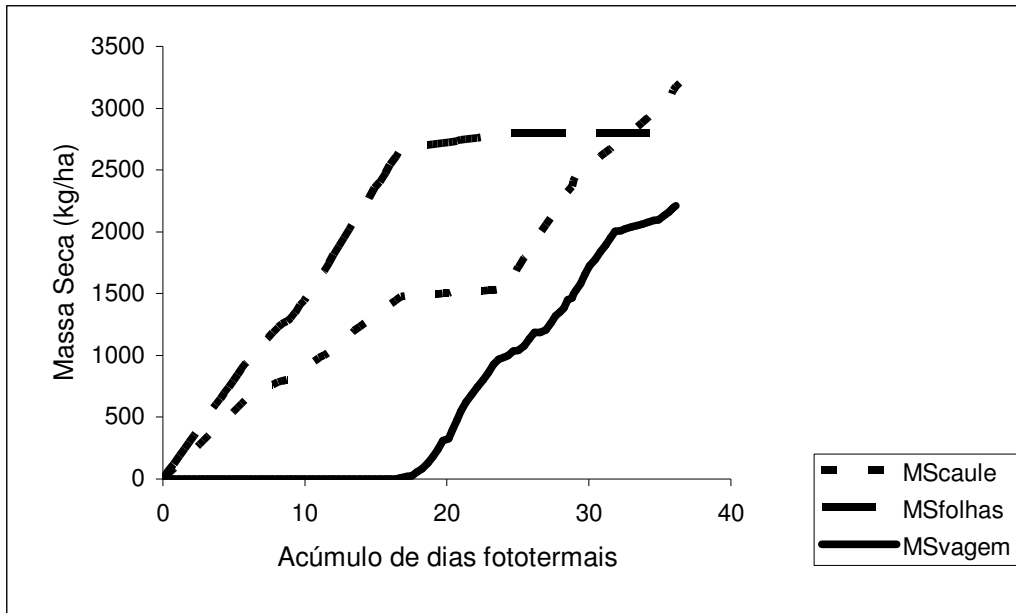


Figura 31- Simulação da Distribuição da Massa Seca Acumulada pela parte área da cultura da soja na semeadura aos 346 Dias Julianos do ano agrícola de 1983/84.

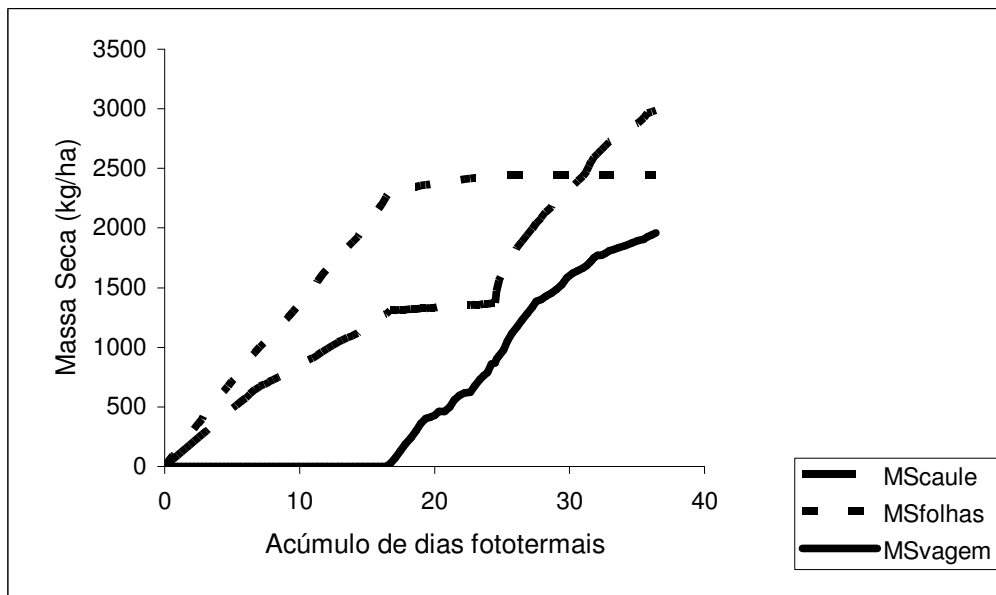


Figura 32 - Simulação da Distribuição da Massa Seca Acumulada pela parte área da cultura da soja na semeadura aos 13 Dias Julianos do ano agrícola de 1983/84.

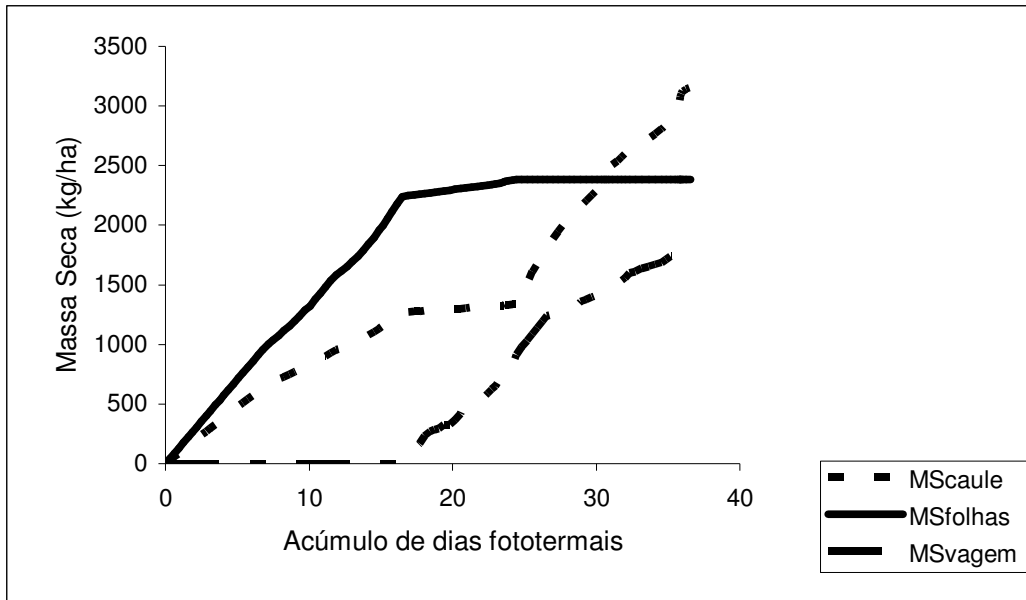


Figura 33 - Simulação da Distribuição da Massa Seca Acumulada pela parte área da cultura da soja na semeadura aos 14 Dias Julianos do ano agrícola de 1983/84.

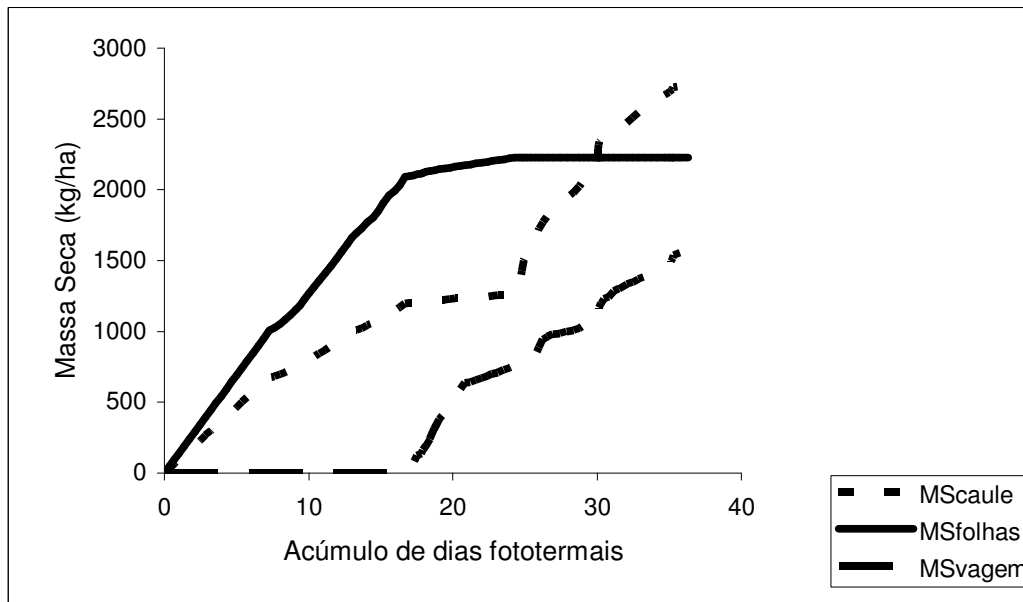


Figura 34 - Simulação da Distribuição da Massa Seca Acumulada pela parte área da cultura da soja na semeadura aos 31 Dias Julianos do ano agrícola de 1983/84.



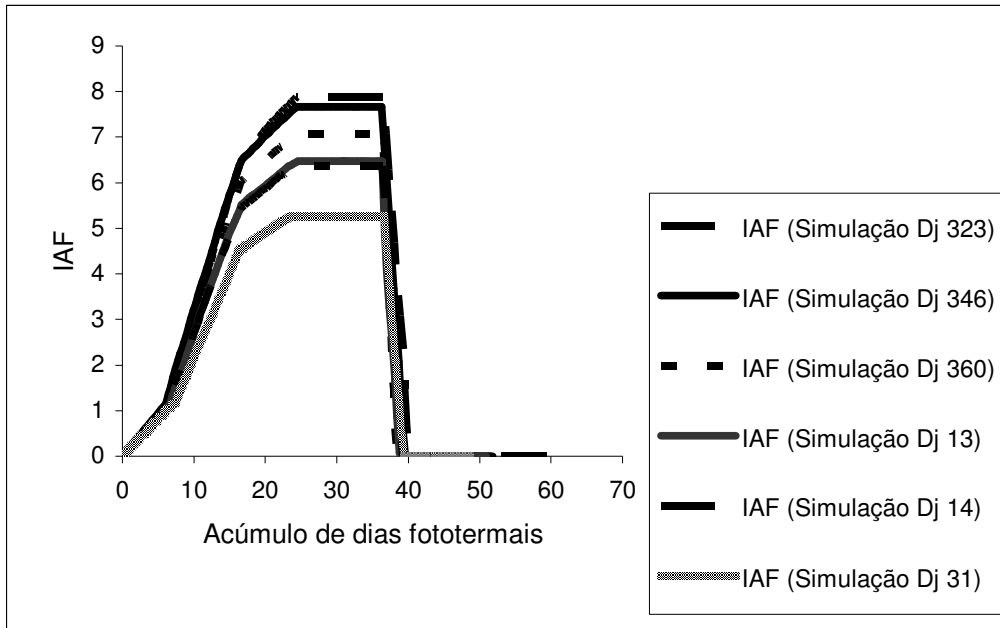


Figura 35 - Simulação do IAF da soja da variedade IAS 5 no ano agrícola de 1984/85.

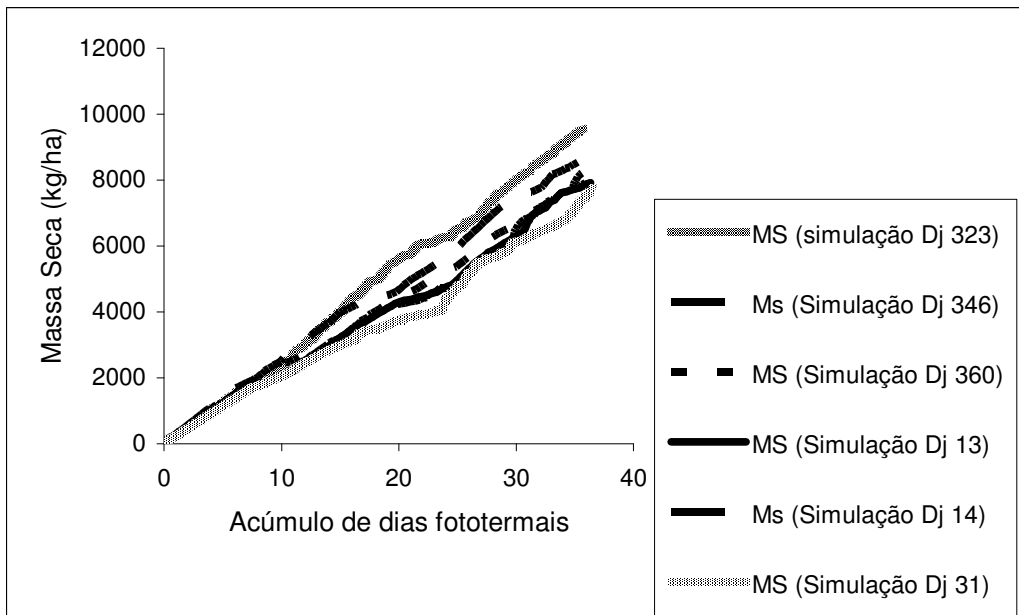


Figura 36 - Simulação da Massa Seca Acumulada pela parte aérea da cultura da soja da variedade IAS 5 no ano agrícola de 1984/85.

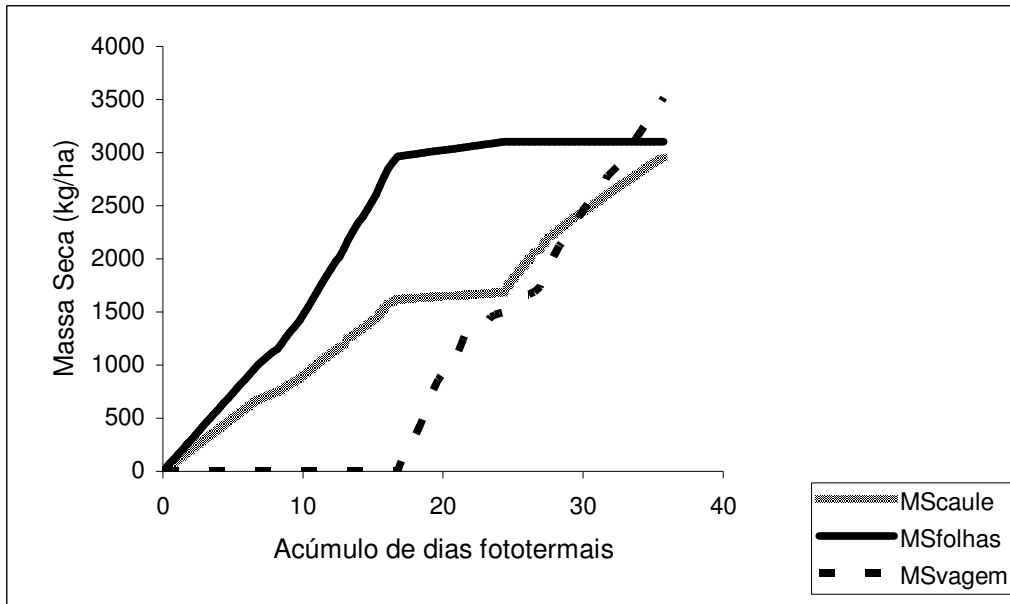


Figura 37 - Simulação da Distribuição da Massa Seca Acumulada pela parte área da cultura da soja na semeadura aos 323 Dias Julianos do ano agrícola de 1984/85.

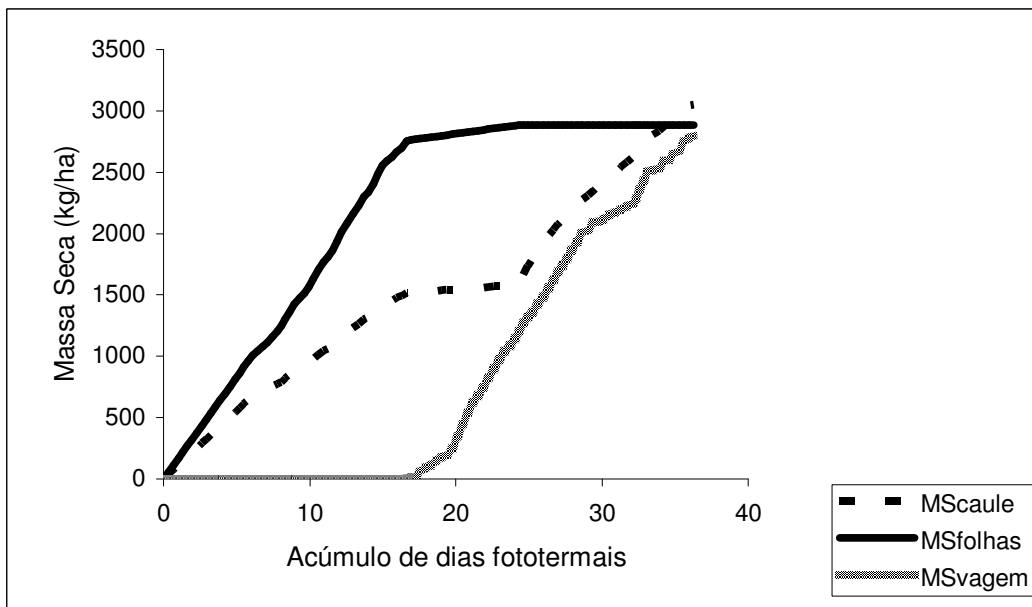


Figura 38- Simulação da Distribuição da Massa Seca Acumulada pela parte área da cultura da soja na semeadura aos 346 Dias Julianos do ano agrícola de 1984/85.

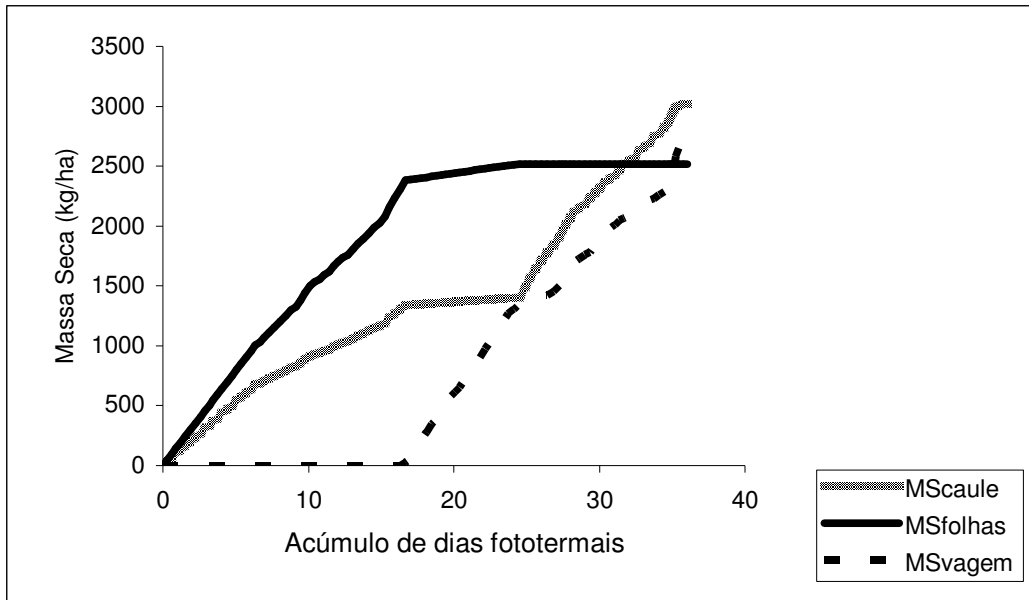


Figura 39 - Simulação da Distribuição da Massa Seca Acumulada pela parte área da cultura da soja na semeadura aos 360 Dias Julianos do ano agrícola de 1984/85.

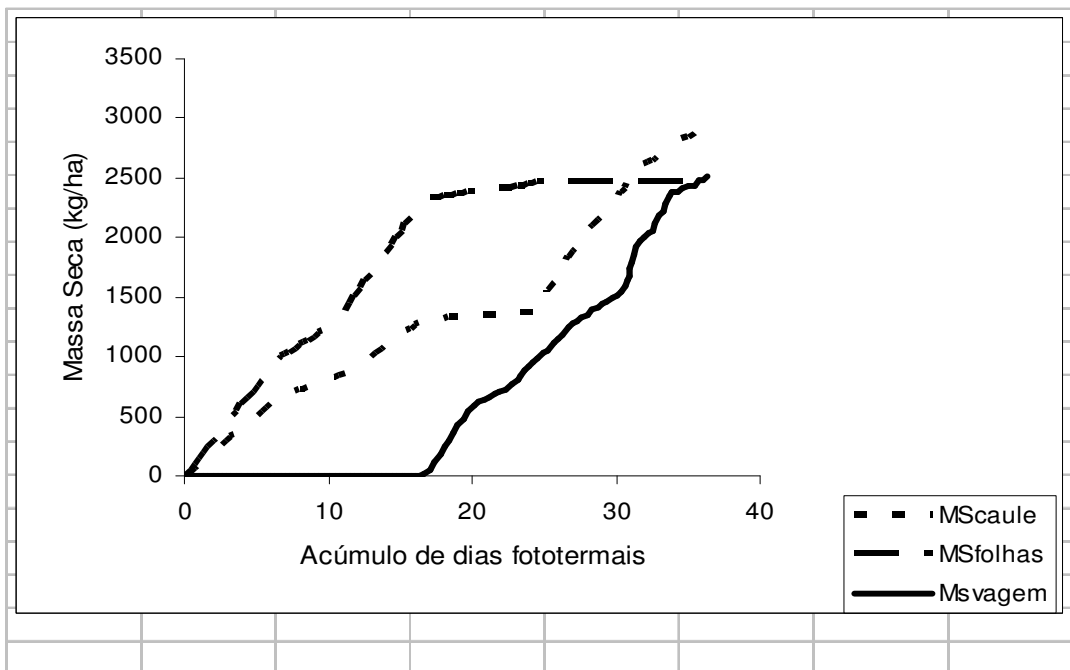


Figura 40 - Simulação da Distribuição da Massa Seca Acumulada pela parte área da cultura da soja na semeadura aos 13 Dias Julianos do ano agrícola de 1984/85.

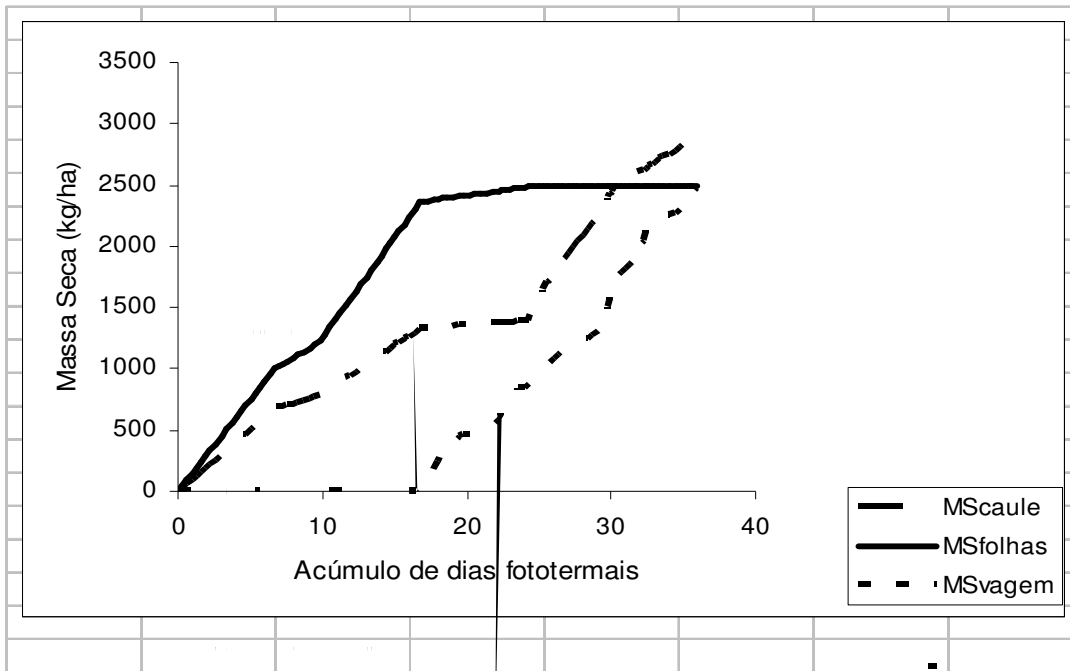


Figura 41 - Simulação da Distribuição da Massa Seca Acumulada pela parte área da cultura da soja na semeadura aos 14 Dias Julianos do ano agrícola de 1984/85.

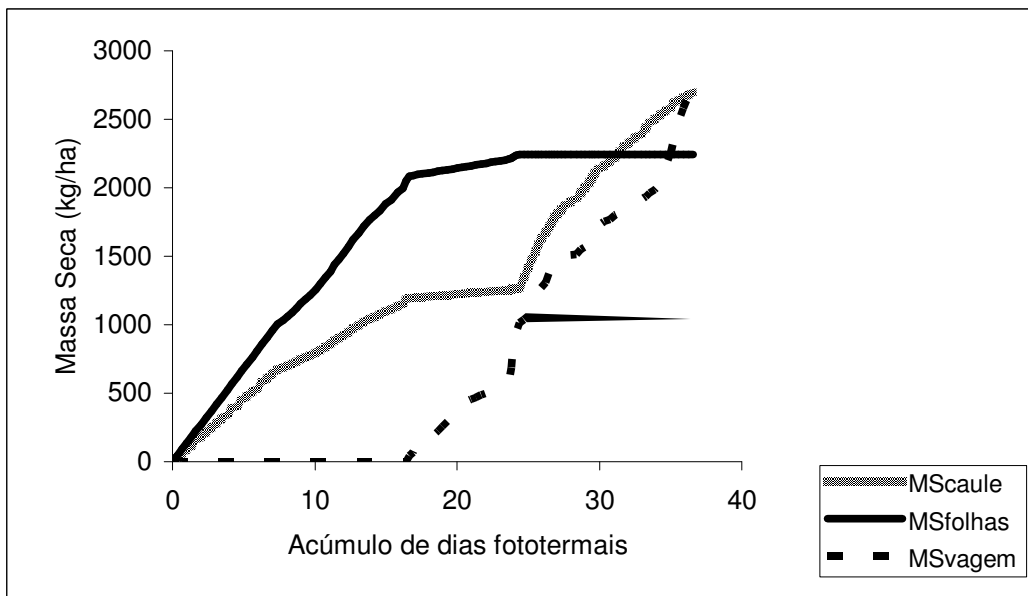


Figura 42 - Simulação da Distribuição da Massa Seca Acumulada pela parte área da cultura da soja na semeadura aos 31 Dias Julianos do ano agrícola de 1984/85.



# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)