

WILLIAMS PINTO MARQUES FERREIRA

**DESENVOLVIMENTO E TESTE DE UM MODELO AGROMETEOROLÓGICO
DE SIMULAÇÃO PARA A CULTURA DA SOJA [*Glycine max (L.) Merrill*]**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Curso de Meteorologia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

**VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
JULHO - 1997**

BIBLIOTECA
DEPTO. ENGENHARIA AGRÍCOLA
UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV

T

F383d
1997

Ferreira, Williams Pinto Marques, 1967-

Desenvolvimento e teste de um modelo agrometeorológico de simulação para cultura da soja [*Glycine max* (L.) Merrill] / Williams Pinto Marques Ferreira. - Viçosa : UFV, 1997.

84p. : il.

Orientador: Luiz Cláudio Costa

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa

1. Soja - Crescimento - Modelo agrometeorológico. 2. Soja - Desenvolvimento - Modelo agrometeorológico. 3. Soja - Fotossíntese. 4. Soja - Respiração. 5. Soja - Efeito do clima. 6. Soja - Graus dias. 7. Soja - Produtividade. I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD. 19.ed. 630.2515

CDD. 20.ed. 630.2515

WILLIAMS PINTO MARQUES FERREIRA

DESENVOLVIMENTO E TESTE DE UM MODELO AGROMETEOROLÓGICO
DE SIMULAÇÃO PARA A CULTURA DA SOJA [*Glycine max* (L.) Merrill]

Tese apresentada à Universidade
Federal de Viçosa, como parte das
exigências do Curso de Meteorologia
Agrícola, para obtenção do título de
Magister Scientiae.

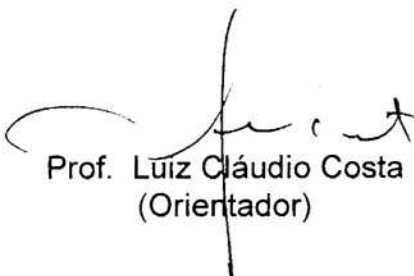
APROVADA: 03 de junho de 1997.


Prof. Valterley Soares Rocha
(Conselheiro)


Prof. Carlos Alberto Martinez Y Huaman
(Conselheiro)


Prof. Everardo Chartuni Mantovani


Prof. Aristides Ribeiro


Prof. Luiz Cláudio Costa
(Orientador)

A DEUS, princípio de tudo, pela vida;
Ao meu avô José Luís Pinto Marques (*in memoriam*);
A meu pai Erberto e minha mãe Naize;
A minha esposa Cecília e aos meus filhos
Theo e àquele que está a caminho;
À minha Irmã Roseane;
Aos meus sobrinhos Tássia e Marcos Paulo.
Com todo o meu amor,
Ofereço.

AGRADECIMENTO

O autor expressa seus sinceros agradecimentos a todos aqueles que contribuíram para a realização deste trabalho.

Ao Professor Luiz Cláudio Costa, pela orientação, que redundou no aperfeiçoamento deste trabalho.

Aos professores da UFV, Gilberto Chohaku Sedyama, Carlos Martinez Y Huaman, Valterley Soares Rocha, Aristides Ribeiro e Everardo Chartuni Mantovani, pelo apoio e pelas sugestões.

Em especial, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq, pela concessão da Bolsa de Estudos.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade em fazer o curso de Meteorologia Agrícola e, em especial, à Área de Construções Rurais, pelo apoio.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola, pela colaboração e amizade.

Todo objetivo alcançado é embasado em firme alicerce, cuja construção nós não edificamos sozinhos. Assim, expresso meus sinceros agradecimentos, pelos primeiros ensinamentos, ao Colégio Estadual de 1º e 2º Graus Professor Ademar Nunes de Vasconcelos.

Aos meus professores Ademar, Délcio M. Pacheco, Carlos B. Pena, Jaime C. Assis, Josefa Nascimento, Olinda R. de M. Soares, Maria das C.

Ramires, Maria das G. de M. Gonçalves, Maria das G. P. do Nascimento, Max, Núbia F. Gonçalves, Olinda R. de M. Soares, Rita Pena e Rosa Carvalho.

Aos funcionários Ana Maria B. da Silva, Benedita de B. Amaro, Dulcinéia M. De Carvalho, Onélia R. Barbosa, Gertrudes dos S. Gonçalves, José do N. Alcântara, Limary L. Fernandes, Luís H. P. da Silva e Maria Modesto.

A Maria da C. C. Araujo e Paulino Pereira ("in memoriam").

Aos meus professores do 2º Grau: Augusto, Gatti, Lisboa, Montenegro, Norman, Romeu e Serra.

Aos meus professores do curso de graduação Aurora, Brigida, Carvalho, Dimitrie, Edson, Francisca, Halley, Isa, José de Paulo, Lôla, Maria do Carmo, Midori, Paulo Souza, Ricardo.

Aos colegas da graduação, em particular a Eliane, Everaldo, Graça, Odalice, Pedro e Ronaldo e aos amigos Sérgio Galdino, Jorge Aragão, Rubem e Leila, pela convivência como verdadeiros irmãos em fases difíceis da minha vida.

Ao compadre Carlos e aos amigos Sebastião Fraconara, Janaína, Josafá, Alexandre, Aurélio, Edir, Elijan, Janiel, José Cláudio, Rogério, Valério e Iraneide, pelo apoio e carinho.

A todos os amigos dos cursos de Meteorologia Agrícola e de Engenharia Agrícola e, em especial, ao Silvando, Abramo e Marcos Vanderlei (Velho), pela colaboração nos momentos difíceis.

Aos amigos de Viçosa, Handrey, Janaina, Luciano, Leonardo, Pedro Bustamante e Zeli pelo convívio.

À Sra. Nazaré e Helena Sabino, pelos serviços prestados.

A toda minha família, pelo incentivo e ajuda, em especial à vovó Arcila e aos tios Antônio, Adherbal, Guilherme, Roberto e Denise, aos primos Andréa e Mauro, pelo apoio, pelo incentivo e pela colaboração nos estudos, e à família de minha esposa, por me tornar um de seus membros.

BIOGRAFIA

WILLIAMS PINTO MARQUES FERREIRA, filho de Erberto Ferreira e Naize Nazarina Pinto Marques Ferreira, nasceu no dia 27 de novembro de 1967, em Belém, no Estado do Pará.

Em setembro de 1993, graduou-se em Meteorologia pela Universidade Federal do Pará, UFPA.

Em outubro de 1993, iniciou o Curso de Pós-Graduação em Meteorologia Tropical, na subárea de Hidrometeorologia, em nível de Especialização, na Universidade Federal do Pará, UFPA.

Em março de 1994, iniciou o Curso de Pós-graduação em Meteorologia Agrícola, em nível de Mestrado, na Universidade Federal de Viçosa, UFV.

Em 03 de junho de 1997, submeteu-se aos exames finais de defesa de tese.

CONTEÚDO

LISTA DE QUADROS	ix
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE SÍMBOLOS	xiii
EXTRATO	xiv
ABSTRACT	xvi
1. INTRODUÇÃO	01
1.1. O problema	01
1.2. Definição e importância dos modelos de simulação.....	03
1.3. Exemplos de modelos no Brasil e no mundo.....	05
1.4. Classificação dos modelos	06
1.5. Interações entre o clima e a cultura da soja	08
1.6. Considerações finais	09
1.7. Estrutura da tese	11
2. O MODELO.....	12
2.1. Local	12
2.2. Características dos elementos climáticos.....	12
2.2.1. Precipitação	13
2.2.2. Temperatura do ar	14
2.2.3. Insolação	14

2.3. Definição do modelo.....	14
2.3.1. Equação da fotossíntese bruta	16
2.3.2. Equação da matéria seca	17
2.3.3. Equação da matéria seca total	17
2.3.4. Penalização pelo déficit hídrico.....	18
2.3.5. Equação do estágio de desenvolvimento	18
2.3.6. Equação do índice de área foliar.....	19
3. SIMULAÇÃO DA INTERAÇÃO CLIMA-CULTURA DA SOJA.....	20
3.1. Temperatura	20
3.1.1. Introdução.....	20
3.1.2. Efeito da temperatura sobre o crescimento e o desenvolvimento da soja.....	21
3.1.3. A temperatura e os modelos	22
3.1.4. A temperatura no SOYCLIMA.....	23
3.1.5. Resultados e discussão.....	24
3.1.6. Conclusões	27
3.2. Radiação solar e fotoperíodo	28
3.2.1. Introdução.....	28
3.2.2. Fotoperíodo	28
3.2.3. Efeito da radiação solar sobre o crescimento e desenvolvimento da soja	29
3.2.4. A radiação e os modelos	30
3.2.5. A radiação e o fotoperíodo no SOYCLIMA.....	31
3.2.6. Resultados e discussões.....	32
3.2.7. Conclusões.....	34
3.3. Umidade do solo.....	35
3.3.1. Introdução.....	35
3.3.2. Efeitos da umidade sobre o crescimento e desenvolvimento da soja	36
3.3.3. A umidade e os modelos	38
3.3.4. A umidade no SOYCLIMA	39
3.3.5. Resultados e discussão.....	39

3.3.6 Conclusões	41
3.4. Variação na data de plantio	43
3.4.1. Introdução.....	43
3.4.2. Resultados e discussão.....	44
3.4.2.1. Índice de área foliar	44
3.4.2.2. Fotossíntese líquida.....	45
3.4.2.3. Matéria seca dos grãos.....	45
3.4.3. Conclusões.....	47
4. TESTE E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MODELO	48
4.1. Teste do modelo.....	48
4.1.1. Introdução.....	48
4.1.2. Metodologia.....	48
4.1.3. Resultados e discussão.....	48
4.1.4. Análise de crescimento e produtividade.....	50
4.1.5. Data da colheita.....	54
4.1.6. Matéria seca final	55
4.1.7. Produtividade final.....	55
4.1.8. Conclusões.....	56
4.2. Análise de sensibilidade com relação a área foliar específica	56
4.2.1. Introdução.....	56
4.2.2. Metodologia.....	56
4.2.3. Resultados e discussão	56
4.2.4. Conclusões.....	57
RESUMO E CONCLUSÕES.....	58
RECOMENDAÇÕES	60
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	62
APÊNDICES	76
APÊNDICE A	77
APÊNDICE B	78
APÊNDICE C	79

LISTA DE QUADROS

- 1 Produtividade da cultura da soja no Brasil, para os anos agrícolas de 1975 a 1982 2
- 2 Médias mensais de temperatura do ar, em °C, precipitação, em mm e radiação solar global, em MJ.m⁻², para a localidade de Capinópolis, MG (Normais Climatológicas) 13
- 3 Número de dias necessários para ocorrer o início do florescimento (Dias Após o Plantio, DAP), em função de variações de ±0,5°C e ±1°C na Temperatura em torno da Temperatura Média (Normais Climatológicas) para a localidade de Capinópolis, MG 25
- 4 Variação da matéria seca de grãos e matéria seca final, em Kg.ha⁻¹, e índice de colheita (IC), em %, em função da variação de ±0,5°C e ±1°C na temperatura em relação à média (Normais Climatológicas) ao longo do período estudado, para a localidade de Capinópolis 27
- 5 Variação da matéria seca final e dos grãos, em kg.ha⁻¹, e do índice de colheita (IC), em %, em função da variação de ±20% e ±40% da radiação solar em relação à média (Normais Climatológicas) ao longo do período estudado, para a localidade de Capinópolis 34
- 6 Variação da matéria seca final e dos grãos, em kg.ha⁻¹, e do índice de colheita (IC), em %, em função da variação de ±20% e ±40% do valor da precipitação em relação à média (Normais Climatológicas) ao longo do período estudado, para a localidade de Capinópolis 40
- 7 Variação da matéria seca final e dos grãos, em kg.ha⁻¹, e do índice de colheita (IC), em %, em função da variação na data de plantio da cultura da soja 47

8	Valores de matéria seca, em $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, distribuída para as folhas, caule, raízes e grãos, e de matéria seca total da soja em função de dias transcorridos após o plantio (DAP), para os anos de 1995/96	52
9	Valores de matéria seca, em $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, distribuída para as folhas, caule, raízes e grãos, e de matéria seca total da soja em função de dias transcorridos após o plantio (DAP) para os anos de 1996/97	53
10	Dados simulados e reais da produtividade de grãos entre os anos de 1995/96 e 1996/97, e precipitação durante o ciclo da cultura para os mesmos	55
11	Variação da matéria seca dos grãos, em $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, em função da variação do valor da área foliar específica	57
1A	Parâmetros utilizados pelo modelo SOYCLIMA	77

LISTA DE FIGURAS

- 1 Valores do índice de área foliar (IAF), em $m^2.m^{-2}$, em função de dias transcorridos após o plantio (DAP), para variações de $\pm 0,5^\circ C$ e $\pm 1^\circ C$ na temperatura em relação à média (Normais Climatológicas) ao longo do período estudado, para a localidade de Capinópolis 26
- 2 Valores de fotossíntese líquida, em $kg(CO_2).m^{-2}.d^{-1}$, em função de dias transcorridos após o plantio (DAP), para variações de $\pm 0,5^\circ C$ e $\pm 1^\circ C$ na temperatura em relação à média (Normais Climatológicas) ao longo do período estudado, para a localidade de Capinópolis 26
- 3 Valores do índice de área foliar, em $m^2.m^{-2}$, em função de dias transcorridos após o plantio (DAP), para variações de $\pm 20\%$ e $\pm 40\%$ na radiação em relação à média (Normais Climatológicas) ao longo do período estudado, para a localidade de Capinópolis 33
- 4 Valores de fotossíntese líquida, em $kg(CO_2).m^{-2}.d^{-1}$, em função de dias transcorridos após o plantio (DAP), para variações de $\pm 20\%$ e $\pm 40\%$ na radiação em relação à média (Normais Climatológicas) ao longo do período estudado, para a localidade de Capinópolis 33
- 5 Valores de penalização da fotossíntese bruta em função de dias transcorridos após o plantio (DAP), para variações de $\pm 20\%$ e $\pm 40\%$ na umidade em relação à média (Normais Climatológicas) ao longo do período estudado, para a localidade de Capinópolis 41
- 6 Valores de fotossíntese líquida, em $kg(CO_2).m^{-2}.d^{-1}$, em função de dias transcorridos após o plantio (DAP), para variações de $\pm 20\%$ e $\pm 40\%$ na umidade em relação à média (Normais Climatológicas) ao longo do período estudado, para a localidade de Capinópolis 42

7	Valores de índice de área foliar, em $m^2.m^{-2}$, em função de dias transcorridos após o plantio (DAP), para variações de $\pm 20\%$ e $\pm 40\%$ na umidade em relação à média (Normais Climatológicas) ao longo do período estudado, para a localidade de Capinópolis	42
8	Valores de índice de área foliar, em $m^2.m^{-2}$, em função de dias transcorridos após o plantio (DAP), para diferentes datas de plantio	44
9	Valores de fotossíntese líquida, em $kg(CO_2).m^{-2}.d^{-1}$, em função de dias transcorridos após o plantio (DAP), para diferentes datas de plantio	46
10	Valores de penalização da fotossíntese bruta em função de dias transcorridos após o plantio (DAP), para diferentes défices hídricos nas diferentes datas de plantio	46
11	Valores de índice de área foliar, em $m^2.m^{-2}$, em função de dias transcorridos após o plantio (DAP), para os anos de 1995/96 e 1996/97	49
12	Valores de penalização da fotossíntese bruta em função de dias transcorridos após o plantio (DAP), para diferentes défices hídricos, para os anos de 1995/96 e 1996/97	50
13	Valores de fotossíntese líquida, em $kg(CO_2).m^{-2}.d^{-1}$, em função de dias transcorridos após o plantio (DAP), para os anos de 1995/96 e 1996/97	51
14	Partição da matéria seca, em $kg.m^{-2}$, em função de dias transcorridos após o plantio (DAP), para os anos 1995/96	51
15	Partição da matéria seca, em $kg.m^{-2}$, em função de dias transcorridos após o plantio (DAP), para os anos 1996/97	52
16	Valores de respiração de manutenção, em $kg(CO_2).kg(MS).d^{-1}$, dos carboidratos, em $kg(CO_2).m^{-2}.d^{-1}$, e da fotossíntese bruta, em $kg(CO_2).m^{-2}.d^{-1}$, em função de dias transcorridos após o plantio (DAP)	54
1B	Fluxograma esquemático representativo do modelo SOYCLIMA	78

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo

AFE	área foliar específica ($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)
Eto	evapotranspiração de referência (mm)
IAF	índice de área foliar ($\text{m}^2_{(\text{de folha})} \text{m}^{-2}_{(\text{de solo})}$)
KC	coeficiente da cultura
PRP	precipitação pluvial (mm)
RAD	radiação solar ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$)
RFA	radiação fotossinteticamente ativa ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$)
TEMP	temperatura ($^{\circ}\text{C}$)

EXTRATO

FERREIRA, Williams Pinto Marques, M.S., Universidade Federal de Viçosa, Julho de 1997. **Desenvolvimento e Teste de um Modelo Agrometeorológico de Simulação para a Cultura da Soja [*Glycine max* (L.) Merrill]**. Professor Orientador: Luiz Cláudio Costa. Professores Conselheiros: Prof. Carlos Alberto Martinez Y Huaman, Gilberto Chohaku Sedyama e Valterley Soares Rocha.

Objetivando verificar o efeito das variações climáticas sobre a produtividade da cultura da soja, em Minas Gerais, desenvolveu-se um modelo de simulação dinâmico, mecanístico e determinístico. O modelo desenvolvido teve como principal característica o equilíbrio entre a simplicidade no seu manuseio e o rigor científico necessário. Como variáveis de entrada o modelo utiliza os elementos climáticos precipitação, temperatura e insolação, por serem de fácil obtenção. Durante a fase de teste e ajuste do modelo foram utilizados os dados climáticos para os anos agrícolas de 1995/96 e 1996/97, bem como os dados normais para a região produtora de Capinópolis, MG. Os resultados mostraram que as variações da disponibilidade térmica, solar e hídrica durante o ciclo da cultura alteram diferencialmente os mecanismos de captura (área foliar) e utilização (fotossíntese) da radiação. No entanto, o fator que mais se destacou foi a radiação. Os resultados mostraram, também, que o rendimento de grãos, matéria seca, índice de área foliar e fotossíntese são

satisfatoriamente estimados pelo modelo SOYCLIMA. A eficiência do modelo na determinação das variações morfológicas e fisiológicas da cultura, em resposta às variações climáticas, evidencia o seu alto potencial de aplicação para o manejo da cultura. O modelo apresentou 87,5% de ajustamento em relação à produtividade, para os anos de 1995/96, e 93,2% para os anos de 1996/97.

ABSTRACT

FERREIRA, Williams Pinto Marques, M.S., Federal University of Viçosa, July 1997. **Development and Test of an Agrometeorological Simulator Model for Soybean [*Glycine max* (L.) Merrill]**. Adviser: Luiz Cláudio Costa. Committee Members: Carlos Alberto Martinez Y Huaman, Gilberto Chohaku Sedyama and Valterley Soares Rocha.

Aiming to verify the effects of the climatic variation on the productivity of soybean in Minas Gerais state, Brazil, it was developed a dynamic-mechanistic-deterministic simulation model. The main characteristic of the developed model was the equilibrium between its management simplicity and the required scientific accuracy. As the input variables, the model applies the climatological elements, that is, rainfall precipitation, temperature and insolation because they are easily obtained. During the phase of testing and adjusting the model, it were used the climatic data for the agricultural years of 1995/96 and 1996/97 as well as the normal data for the productive region of Capinópolis, Minas Gerais state. The results showed that, during the vegetative cycle, the variation of thermal, solar and hydric availabilities, modified differently both the mechanisms of capturing (leaf area) and utilizing (photosynthesis) radiation. However, the most remarkable factor was radiation. The results also showed that grain and dry matter productivity, the leaf area index and photosynthesis are satisfactorily estimated by SOYCLIMA model. The performance of the

model in determining the crop morphologic and physiological variations, in response to climatic changes, emphasizes its high application potential for managing crop. The model presented a 87,5% accuracy relative to productivity for the years of 1995/96, and 93,2% for 1996/97.

1. INTRODUÇÃO

1.1. O problema

Buscando reduzir a variação da produtividade agrícola e otimizar o uso dos recursos tecnológicos e ambientais na produção de alimentos, os cientistas têm procurado, cada vez mais, conhecer os fatores que afetam, direta ou indiretamente, as atividades agrícolas. Estudos têm mostrado que variações de longo prazo na produtividade das culturas são causadas por fatores, como a introdução de novas técnicas de manejo, as variedades e insumos. Um exemplo típico de tal variação é a evolução da produtividade da cultura da soja, em Minas Gerais, passando de $1.200 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ na década de 70 para cerca de $2.200 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, na década de 90. Por outro lado, variações de curto prazo na produtividade, ou seja, de um ano para o outro, são devidas principalmente às alterações climáticas. A queda na produtividade, ocorrida em Minas Gerais em 1990, ano no qual as condições climáticas foram desfavoráveis ao desenvolvimento da cultura, ilustra tal influência. Em 1989 a produtividade foi aproximadamente $2.000 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, caindo para cerca de $1.300 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, em 1990, e retornando ao nível de $2.000 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, em 1991. Como não se espera que grandes alterações de variedades, insumos e manejo tenham ocorrido nesse período, o clima foi o principal fator responsável por esta variação, correspondente a 35%.

Outro exemplo da influência do clima pode ser observado no Quadro 1, que apresenta a produtividade de soja, no Brasil, referente ao período 1975-1982. Observa-se que a produtividade foi sensivelmente reduzida nos anos agrícolas de 1977/78 e 1978/79. Esta redução ocorreu devido às severas restrições hídricas em períodos críticos da cultura (CAMARGO, 1984).

Quadro 1 - Produtividade da cultura da soja no Brasil, para os anos agrícolas de 1975 a 1982

Ano Agrícola	1975-76	1976-77	1977-78	1978-79	1979-80	1980-81	1981-82
Brasil							
Produtividade (kg.ha ⁻¹)	1750	1769	1225	1240	1727	1765	1562

Fonte : Anuário Estatístico do Brasil. Fundação IBGE 1977/82

Tais exemplos demonstram a necessidade de se ter um melhor entendimento a respeito da interação clima-cultura, no sentido de permitir ao agricultor e ao país um melhor planejamento de suas questões agrícolas. Os estudos sobre a interação clima-cultura têm alcançado grande avanço, nos últimos anos, e vêm sendo desenvolvidos por meio da análise dos aspectos físicos, fisiológicos e agrometeorológicos, envolvidos nesta interação. Estes estudos objetivam reduzir o efeito das adversidades climáticas sobre as culturas, no sentido de diminuir as variações na produtividade. Atualmente a realização destes estudos vem sendo possibilitada pela evolução acelerada no desenvolvimento de equipamentos micrometeorológicos, permitindo uma caracterização mais efetiva da interação entre o clima e a cultura (MONTEITH e UNSWORTH, 1990).

Além da experimentação agrometeorológica convencional, que tem como característica uma grande demanda de tempo e equipamentos, também, ferramentas matemáticas e estatísticas, bem como modelos de simulação vêm sendo cada dia mais empregados na análise dos efeitos das condições ambientais sobre a produtividade agrícola. A aplicação destas técnicas

constitui uma ferramenta eficiente na quantificação desses efeitos (MONTEITH, 1981).

Atualmente, no entanto, a agrometeorologia tem como desafio não apenas a quantificação, mas, também, a explicação mais detalhada dos efeitos das variações climáticas de longo prazo e das oscilações de curto prazo do tempo sobre o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade das culturas, na busca de soluções simples para um problema reconhecidamente complexo. O entendimento da interação clima-cultura possibilitará escolher variedades e técnicas de manejo mais adequadas para uma determinada região.

1.2. Definição e importância dos modelos de simulação

THORNLEY (1976) definiu o modelo de simulação como uma equação ou conjunto de equações capazes de representar um sistema real. Se o sistema for dinâmico, o modelo deve ser capaz de simular suas mudanças ao longo do tempo.

A aplicação de modelos de simulação é uma ferramenta de grande importância, uma vez que oferece diversas vantagens nos estudos da interação clima-cultura, tais como: estimativa de produção potencial (AGGARWAL, 1988), estratégia e tática de decisão de marketing, previsão de efeitos de mudanças climáticas e variabilidade climática de curto prazo (ADAMS et alii, 1990; AGGARWAL e SINHA, 1993). Além disso, os modelos possibilitam considerar um grande número de fatores ambientais que afetam a cultura, bem como a análise dos efeitos da combinação desses fatores, o que seria impossível em experimentos convencionais.

Para o desenvolvimento de um modelo agrometeorológico, há necessidade de um completo entendimento sobre o sistema a ser modelado. Isto é explicado pela ocorrência de uma série de processos nos diferentes órgãos da planta, o que torna o modelo uma representação bastante complexa da realidade. Evidencia-se, portanto, a necessidade de participação de equipes multidisciplinares na elaboração de modelos, estimulando novas idéias e experimentos, transformando os modelos em suportes estratégicos no

incentivo às pesquisas, bem como evidenciando seu aspecto didático e científico cujo objetivo principal consiste em avançar no conhecimento.

Uma das técnicas mais utilizadas na elaboração de modelos é a teoria reducionista, a qual divide o objeto de estudo em diferentes níveis. Desse modo, a aplicação de modelos de simulação permitirá analisar, detalhadamente, a produtividade, o crescimento e desenvolvimento das plantas, possibilitando uma visão integrada de seu comportamento no sistema.

As hipóteses consideradas no sistema representado pelo modelo, quando expressas em termos matemáticos, fornecem uma descrição quantitativa e a possibilidade de entendimento do mecanismo do sistema biológico das plantas, estimulando a adoção de métodos mais eficientes no manejo da cultura.

Apesar da complexidade envolvida na construção de modelos, os esforços são compensados em função de sua grande aplicabilidade. Esta aplicabilidade permite ao agricultor utilizar modelos no processo de tomada de decisão, o que permitirá uma organização racional de questões envolvendo distribuição, armazenamento, comercialização do produto agrícola, dentre outros.

Além disso, os modelos possibilitam melhor orientação das pesquisas, uma vez que induzem à montagem de experimentos voltados para o entendimento de questões específicas. Os modelos podem, ainda, permitir uma aplicação mais completa e detalhada de dados obtidos em experimentação convencional. Estes dados têm se tornado cada vez mais precisos, embora sua obtenção seja, também, cada vez mais cara.

É evidente que, embora os modelos de simulação tenham grande aplicabilidade e seu custo seja inferior àquele dos experimentos convencionais, eles não podem ser considerados substitutos dos experimentos, mas, uma técnica que os complementa.

Pode-se, portanto, afirmar que, quando incorporado em um programa de fácil manipulação, o modelo de simulação torna-se um meio simples de levar o conhecimento científico até o agricultor (AZAM-ALI et alii, 1994).

1.3. Exemplos de modelos no Brasil e no mundo

Atualmente, a utilização de modelos na agricultura tem grande alcance em diversos países. Vários modelos exemplificam este fato, como o CERES-Maize, desenvolvido por Jones e Kiniry (1986), citados por LIMA (1995), que é capaz de simular o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade de várias culturas, dentre as quais o milho e a soja para diversas condições ambientais. Outro exemplo é o modelo WTGROWS (AGGARWAL e KARLA, 1994), que relaciona os efeitos dos fatores climáticos das características do solo e das técnicas de manejo sobre o crescimento, desenvolvimento e produtividade do trigo.

GUTIERREZ et alii (1993) desenvolveram um modelo que, a partir de elementos climáticos como a radiação solar e a precipitação, dentre outros, possibilita realizar a simulação da dinâmica das massas de carbono e nitrogênio nas folhas, no caule, na raiz e nos frutos.

Outro exemplo é o ALCEPAS, modelo desenvolvido por VISSER (1994), que simula o crescimento potencial para a cultura da cebola considerando a densidade de plantio, a data de emergência e os fatores ambientais.

JOHNSON e THORNLEY (1983) desenvolveram um modelo que simula o tempo de curso da matéria seca e do desenvolvimento de área foliar para a grama, no campo, durante uma mudança de estação.

Embora o potencial dos modelos de simulação já seja comprovado em estudos agrometeorológicos, em diversos países, tais técnicas ainda são pouco utilizadas no Brasil. Alguns modelos, a maioria com fundamento estatístico, foram desenvolvidos em São Paulo, Rio Grande do Sul e Minas Gerais. Exemplificando, pode-se citar o Modelo Agrometeorológico de Previsão de Produtividade da Soja para as Regiões do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, Minas Gerais (COSTA, 1988). Na formulação deste modelo, foram incorporadas as variáveis tecnológicas, tais como o ano de plantio da cultura e elementos climáticos, como precipitação pluvial e temperatura, possibilitando prever a produtividade da soja no mês de dezembro, ou seja, com grande antecedência, pois, geralmente a colheita inicia-se em março.

Outro modelo de previsão da produtividade de soja no Estado de Minas Gerais foi desenvolvido por LIU e LIU (1986). Utilizando técnicas de regressão linear e não-linear, baseados em elementos climáticos, eles obtiveram modelos para a previsão da safra no estado, que apresentavam erros de previsão entre 0,1% e 8,3%.

1.4. Classificações dos modelos

O aparecimento de diferentes tipos de modelos gerou a necessidade de classificá-los. Assim, utilizando a arquitetura e a filosofia dos modelos como critérios principais, eles foram classificados em duas categorias, ou seja, modelos empíricos e de simulação ou mecanísticos. Os modelos empíricos baseiam-se na interação planta-ambiente, gerando resultados quantitativos, enquanto os modelos de simulação, além de basear-se na interação planta-ambiente, buscam também explicar, em nível de mecanismos, os componentes físicos e fisiológicos do sistema em questão (ADDISCOTT e WAGNET, 1985).

O modelo empírico fundamenta-se em relações derivadas a partir de análises de regressões e, geralmente, necessita de grande número de dados para seu desenvolvimento. A principal desvantagem deste modelo é que ele não deve ser aplicado fora da região geográfica para o qual foi calibrado. É uma simples descrição matemática-estatística dos dados que não leva a um entendimento científico do sistema, ou seja, não gera conhecimento. Contudo, este modelo não deve ser descartado, pois tem ampla margem de acerto para fins de previsão de produtividade, tornando-se, portanto, ferramenta muito útil para a respectiva região para a qual foi desenvolvido (FRANCE e THORNLEY, 1984).

Nos modelos de simulação ou mecanísticos, entretanto, há uma tentativa de basear sua estrutura no processo que ocorre no sistema real considerado, ou seja, tenta-se fazer uma descrição baseada no entendimento do sistema. Estes modelos consideram que todo sistema pode ser dividido em um número infinito de níveis. Dessa forma, cada nível constitui uma integração dos itens do nível inferior. Assim, o modelo mais simples pode considerar

somente um primeiro nível; neste caso, conseqüentemente, não são considerados os subcomponentes do sistema em um nível inferior, ou seja, o modelo deve basear-se no nível mais fundamental na organização hierárquica do sistema.

Na prática, dentro de um modelo mecanístico podem existir subprocessos empíricos. A taxa da fotossíntese, por exemplo, pode ser calculada a partir de funções empíricas que envolvem dados experimentais de temperatura e de intensidade da radiação solar. Cada um desses subcomponentes seria uma descrição empírica de um processo particular que, entretanto, é combinado de forma mecanística (FRANCE e THORNLEY, 1984).

Os modelos mecanísticos podem ser divididos em modelos estáticos, que não consideram a variável tempo, e em modelos dinâmicos, que a consideram. Numa análise mais geral, verifica-se que todo sistema sofre alterações com o tempo e, dessa forma, nem todos os modelos estáticos podem ser considerados como aproximação do sistema real. Entretanto, no caso em que o sistema muda lentamente, a aproximação utilizando um modelo estático pode ser considerada adequada e de grande utilidade. O mapa da terra representa uma exemplificação de modelo estático de grande utilidade. Na verdade, enquanto a terra está em constante movimento, montanhas crescem como, também desaparecem. Enquanto os continentes estão em constante movimento, os rios modificam-se, e assim por diante; tais processos, porém, são muito lentos. Ainda assim, o modelo estático cartográfico pode ser muito útil para eventos de curto prazo.

O modelo dinâmico, ao contrário, inclui explicitamente a variável tempo e considera o sistema alterando-se na escala de tempo de interesse do modelador. Portanto, pode-se afirmar que a maioria dos modelos são dinâmicos. Nas modelagens para plantas, os valores de massa, área foliar e produtividade mudam durante o ciclo da cultura. Contudo, um modelo agrometeorológico deve conter submodelos que são, naturalmente, estáticos. Tal fato pode ser observado em modelos que consideram o submodelo de interceptação de luz, admitindo a variação da irradiância ao longo do dia (dinâmicos) e em outros que, simplesmente, consideram um valor médio diário, ou seja, um submodelo estático (ADDISCOTT e WAGNET, 1985).

A literatura científica define também os modelos determinísticos, ou seja, modelos que não consideram a estimativa do nível de incerteza em seus resultados. Entretanto, sabe-se que, na prática, há sempre alguma incerteza quanto às previsões, causada pela manipulação dos dados ou pela baixa qualidade das informações que alimentam o modelo. Esta última provém de três fontes principais: incerteza nos dados de entrada, incerteza em alguns dados inerentes às equações do modelo e incertezas sistemáticas, que ocorrem devido a simplificações e aproximações inerentes à estrutura dos modelos (THORNLEY e JOHNSON, 1990).

Em contrapartida, existem os modelos estocásticos que seriam aqueles nos quais é possível examinar as influências das duas primeiras fontes de incerteza citadas no parágrafo anterior. Entretanto as considerações contidas nesses modelos são estritamente conceituais. É necessário considerar, também, que a maioria dos modelos são sensíveis a um determinado número de parâmetros, fazendo-se necessária a realização de análises de sensibilidade, a fim de examinar as variações percentuais que ocorrem nos resultados quando os valores de algum parâmetro são alterados (PENNING DE VRIES e SPITTERS, 1991).

1.5. Interações entre o clima e a cultura da soja

Há muito tempo, esforços vêm sendo direcionados no sentido de esclarecer, cada vez mais, as relações existentes entre o clima e a cultura da soja.

GRISSON et alii (1955) verificaram que tanto o excesso quanto a deficiência hídrica, entre a germinação e o florescimento, retardam o crescimento vegetativo da cultura da soja. Outros autores como SHAW e LAING (1965), DOORENBOS e KASSAM (1979), SALINAS et alii.(1989), SEDIYAMA et alii. (1993) e MOTA (1994) também encontraram grande influência do fator hídrico sobre o desenvolvimento da soja.

Segundo ARRUDA et alii (1977), a variação anual da produtividade da soja decorre mais das condições hídricas do que das térmicas. Para

GRISSEON et alii (1955) e SPOONER (1961), na soja, as necessidades hídricas durante o período vegetativo são menos importantes do que durante o período de florescimento e frutificação da cultura.

BROWN (1960) estudando a relação entre a taxa de desenvolvimento das plantas de soja e a temperatura do ar em ambiente controlado, obteve valores de temperatura-base de 10°C e temperatura ótima de 30°C. BROWN e CHAPMAN (1960) observaram ser a relação de BROWN (1960) também válida para as condições de campo, desde que não ocorram limitações de umidade no solo durante o período de florescimento da cultura. Outros autores como GARDNER e ALLARD (1930), PASCALE et alii (1973), VALIO (1979), GANDOLFI e MULLER (1981) e MOTA (1994) também encontraram influência do fator térmico sobre o desenvolvimento da cultura.

Vários outros estudos indicam que, em condições de campo, a fotossíntese e a produção das plantas são limitadas pela quantidade de radiação fotossinteticamente ativa (RFA), por elas interceptada. Portanto, a interceptação e a distribuição da radiação solar, através do perfil da comunidade vegetal, são fatores dominantes, na produção (WENDT, 1978).

Classificada como planta de dia curto, em virtude de seu florescimento com a diminuição do comprimento do dia, a soja apresenta valores de fotoperíodo crítico, ou seja, o comprimento máximo do dia abaixo do qual a planta de dias curtos tem seu florescimento induzido, que varia de acordo com as espécies (SMITH, 1914). As necessidades fotoperiódicas, também, são altamente relacionadas com as necessidades térmicas (MAJOR et alii, 1975).

1.6. Considerações finais

Devido à importância comercial da cultura da soja, para o Estado de Minas Gerais e para o Brasil, bem como à necessidade de novas técnicas alternativas que possibilitem estimar com menor custo, a produção potencial, surgiu a necessidade de desenvolver um modelo de simulação de crescimento, desenvolvimento e produtividade para esta cultura.

O objetivo principal foi a elaboração de um modelo que além de possibilitar a quantificação dos efeitos do clima sobre a produtividade da cultura também permitisse analisar as causas das oscilações da produtividade em resposta às condições climáticas.

Como objetivo, foi também considerado o desenvolvimento de um modelo que apresentasse como principal característica a simplicidade nos dados de entrada (elementos climáticos).

O modelo priorizou, ainda, a simplicidade nos resultados apresentados (dados de saída), a fim de permitir um maior entendimento por parte dos usuários, auxiliando-os, assim, no processo de tomada de decisões.

Assim, no presente trabalho, optou-se pela construção de um modelo dinâmico, objetivando-se a previsão das mudanças físicas na cultura, com o tempo, como uma função dos parâmetros ambientais (WHISLER et alii, 1986).

O modelo desenvolvido pode ser, ainda, caracterizado, como mecanístico devido ao fato de basear-se no nível de organização hierárquica do sistema modelado, buscando o entendimento das relações clima-cultura (FRANCE e THORNLEY, 1984).

E, finalmente, o modelo é determinístico pelo fato de não fazer considerações de estimativa do nível de incerteza de suas previsões.

Resumindo, o modelo aqui desenvolvido é considerado de simulação dinâmico, mecanístico e determinístico, que além de representar uma ferramenta importante para determinação dos fatores ambientais que mais afetam a cultura, possibilita também analisar o efeito da combinação desses fatores sobre o comportamento da soja em situações climáticas extremas.

Devido ao modelo apresentar como dados de entrada somente dados climáticos, o mesmo foi denominado de SOYCLIMA.

Deve-se destacar que o modelo simula o crescimento potencial da cultura levando em consideração possíveis restrições em função da disponibilidade de água, temperatura e radiação solar para a planta, porém, não considera outras restrições como os nutrientes, por exemplo. Tal fato deve, pois, ser considerado na análise dos resultados apresentados pelo modelo.

1.7. Estrutura da tese

O presente trabalho é estruturado de modo que sejam analisadas, seqüencialmente, as influências de elementos climáticos como a temperatura, radiação solar e umidade sobre a produtividade final da cultura.

O primeiro capítulo consta de uma introdução, abordando a importância da cultura da soja para o país, sua relação com o clima e os meios existentes para reduzir o impacto do clima. São também apresentadas considerações gerais sobre modelos de simulação, abordando seu alcance em diversas áreas, principalmente na agricultura, e são citados os modelos já existentes e suas classificações.

O segundo capítulo aborda o modelo, o local, a variedade e as características dos elementos climáticos.

O terceiro capítulo trata, de modo mais detalhado, os elementos climáticos temperatura, radiação solar e umidade descrevendo sua influência sobre o crescimento e desenvolvimento da soja.

Serão também abordados os resultados obtidos, no caso em que o modelo é executado para diferentes épocas de plantio, utilizando-se dados médios das Normais Climatológicas, que são médias de 30 anos (1961 a 1990) de dados para a região de Capinópolis.

No quarto capítulo serão efetuados os testes específicos para dados reais em dois anos consecutivos, e ainda é realizada a análise de sensibilidade do modelo a variações do índice de área foliar.

2. O MODELO

2.1. Local

Embora a aplicação do modelo não esteja sujeita a restrições geográficas, neste trabalho optou-se pela seleção de uma localidade específica visando obter um melhor controle dos dados de entrada.

Assim, os dados para execução do modelo referem-se à localidade de Capinópolis, situada na região do Triângulo Mineiro, Estado de Minas Gerais (latitude 18° 41' S; longitude 49° 34' W e altitude da estação meteorológica de 620,60 m), que é a maior região produtora de soja neste estado.

2.2. Características dos elementos climáticos

Neste modelo, devido a sua acentuada influência no desenvolvimento e na produtividade da cultura da soja, foram considerados como dados de entrada a temperatura, a precipitação pluvial e a radiação solar.

Entretanto como o modelo tem como objetivo a simplicidade nos dados de entrada, a radiação solar foi obtida a partir de dados de duração do brilho solar diário (insolação), que são facilmente obtidos, sendo para isso utilizada a

equação empírica de Angström, modificada por Prèscott (VIANELLO e ALVES, 1991).

A caracterização das condições meteorológicas em termos de temperatura (TEMP), precipitação pluvial (PRP) e insolação (INS), no período de 01/09 a 31/04, que compreende dois meses antes e cinco meses após o mês de novembro (mês de plantio da soja na região), é apresentada no Quadro 2. Os dados são valores médios da região em estudo e foram obtidos a partir das Normais Climatológicas (DEPARTAMENTO..., 1992).

Quadro 2 - Médias mensais de temperatura do ar, em °C, precipitação, em mm e radiação solar global, em MJ.m⁻², para a localidade de Capinópolis, MG (Normais Climatológicas)

Meses	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.
Temperatura	23,9	24,7	24,3	23,7	23,8	24,1	24,0	23,3
Precipitação	51,0	157,4	180,0	267,5	291,4	201,9	188,7	115,2
Insolação	197,4	220,9	203,9	167,8	192,5	194,7	203,7	220,3

2.2.1. Precipitação

Observando os dados normais para a região de Capinópolis, apresentados no Quadro 2, verifica-se que a precipitação média mensal apresenta um valor relativamente pequeno no primeiro mês em comparação aos valores dos meses subseqüentes.

Os dados evidenciam, ainda, um aumento na quantidade de precipitação a partir de setembro, mantendo esta tendência até janeiro, ocorrendo, posteriormente, um decréscimo.

Em função da análise climática da disponibilidade hídrica na região, neste trabalho, optou-se por considerar cinco datas de plantio (15 de outubro, 01 de novembro, 15 de novembro, 01 de dezembro e 15 de dezembro), para a execução do modelo.

2.2.2. Temperatura do ar

Outro parâmetro importante para o desenvolvimento da cultura é a temperatura do ar. Pelos valores apresentados no Quadro 2, observa-se que não ocorre variação significativa, em nível de média, ao longo do período considerado.

2.2.3. Insolação

Quanto à insolação, observam-se valores de 200 MJ.m^{-2} em média, para o período considerado, sendo que os valores máximo e mínimo são obtidos em outubro e dezembro, respectivamente.

A diferença entre os valores máximo e mínimo, para o período estudado, foi 53,1 horas e décimos.

Entretanto deve-se destacar que, além da sua grande influência sobre o desenvolvimento da cultura da soja, os elementos meteorológicos precipitação pluvial, temperatura e “radiação” proveniente da insolação foram escolhidos levando-se em consideração também sua facilidade de obtenção.

2.3. Definição do modelo

No modelo, são consideradas as influências dos diversos elementos climáticos sobre a produtividade da cultura, tornando-se, então, a produtividade final uma função da interação clima-cultura. Assim, foram considerados os seguintes mecanismos: extinção da radiação no dossel, fotossíntese máxima à temperatura considerada, temperatura-base, respiração de manutenção à temperatura considerada, parâmetro Q_{10} (indica um fator multiplicativo da taxa de respiração em função de um determinado aumento na temperatura do ar), área foliar específica e coeficiente de transmissividade. Os parâmetros básicos destes mecanismos, e também de outros, são apresentados no Apêndice A. Outros dados de entrada no modelo foram

necessários para derivar algumas equações, tais como as de balanço hídrico, radiação média, temperaturas médias máximas e temperaturas médias mínimas, dados fenológicos, bem como os dados de produção de matéria seca que foram fornecidos pela equipe de pesquisa da soja da Universidade Federal de Viçosa e pela Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Estado de Minas Gerais (EMATER-MG), além dos dados disponíveis na literatura.

O modelo apresenta, como dados de saída, as variáveis de estado, isto é, variáveis que representam quantidades reais como a matéria seca, e a área foliar, ou abstratas como o estágio de desenvolvimento. Tais variáveis podem ser ainda quantificadas a qualquer momento, ao longo da execução do modelo.

As interações propostas pelo modelo, que descrevem as pressuposições fisiológicas da planta, iniciam-se pela captura e utilização da radiação pela cultura, levando ao cálculo da fotossíntese bruta que, em seguida, transforma-se em carboidrato, que após subtrair os gastos para respiração de manutenção e crescimento, torna-se a matéria seca total disponível para ser dividida entre os diversos órgãos componentes da planta.

No cálculo da matéria seca, considera-se o efeito do déficit hídrico na captura e utilização da radiação. A temperatura é considerada no cálculo dos Graus-Dias acumulados, o qual compõe tanto o cálculo do estágio de desenvolvimento quanto o cálculo do coeficiente da cultura (KC). Considera-se, ainda, o efeito da temperatura na fotossíntese e na respiração.

O estágio de desenvolvimento faz parte do cálculo da partição da matéria seca para os respectivos órgãos da planta e do cálculo do índice de área foliar (IAF), que é um dos componentes do cálculo da fotossíntese bruta.

O coeficiente da cultura, juntamente com a evapotranspiração real e evapotranspiração máxima, faz parte do cálculo da penalização por déficit hídrico.

As pressuposições e todas as interações do modelo, citadas anteriormente, podem ser visualizadas no fluxograma apresentado no Apêndice B.

As equações principais, utilizadas pelo modelo, que procuram representar as pressuposições físicas e fisiológicas referentes à cultura, serão descritas a seguir segundo a ordem na qual que foram abordadas no item anterior.

2.3.1. Equação da fotossíntese bruta

De acordo com FRANCE e THORNLEY (1984), a fotossíntese bruta pode ser calculada pela seguinte equação:

$$F_BRUTA = Fmax \cdot \frac{h}{kdif} \cdot \ln\left(\frac{\delta + \gamma + (2 \cdot \delta \cdot \gamma + \gamma^2)^{1/2}}{\delta \cdot \zeta + \gamma + (2 \cdot \delta \cdot \gamma \cdot \zeta + \gamma^2 \cdot \zeta^2)^{1/2}}\right) \quad (eq.01)$$

em que

F_BRUTA = Fotossíntese bruta, Kg(CO₂).m⁻².d⁻¹;

Fmax = Fotossíntese máxima realizada, Kg(CO₂).m⁻².d⁻¹;

h = Duração de um dia;

kdif = Coeficiente de extinção de luz, adimensional;

ln = Logaritmo neperiano;

delta = Parâmetro delta;

gamma = Parâmetro gama; e

zeta = Parâmetro zeta.

$$\delta = e_fo \cdot kdif \cdot \frac{RFA}{h} \quad (eq.02)$$

em que

e_fo = Eficiência fotoquímica, Kg(CO₂).MJ⁻¹; e

RFA = Radiação fotossinteticamente ativa, MJ.m⁻²;

$$\gamma = (1 - m) \cdot Fmax \quad (eq.03)$$

em que

m = coeficiente de transmissividade de luz, adimensional;

$$zeta = \exp(-kdif \cdot IAF) \quad (\text{eq.04})$$

em que

IAF = Índice de área foliar, $m^2 \cdot m^{-2}$.

2.3.2. Equação da matéria seca

De acordo com PENNING DE VRIES et alii (1989), o cálculo de transformação da fotossíntese bruta em matéria seca pode ser efetuado por meio da seguinte equação:

$$M_SECA = F_BRUTA \cdot \frac{30}{44} \cdot eg \cdot Penal \quad (\text{eq.05})$$

em que

M_SECA = Matéria seca produzida pela planta, $Kg \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$;

$30/44$ = Parâmetro de conversão de carboidratos em matéria seca, adimensional;

eg = Eficiência de crescimento, adimensional; e

$Penal$ = Penalização pelo déficit hídrico, adimensional.

2.3.3. Equação da matéria seca total

De acordo com PENNING DE VRIES et alii (1989), a matéria seca total, resultante após subtrair os gastos para a respiração de manutenção e de crescimento, pode ser obtida por meio da seguinte equação:

$$MS_TOT = M_SECA - RM_TOT \quad (\text{eq.06})$$

em que

MS_TOT = Matéria seca total disponível para a partição para os órgãos da planta, Kg.m⁻²; e

RM_TOT = Respiração de manutenção da planta, KgCO₂.Kg_(ms).d⁻¹.

2.3.4. Penalização pelo déficit hídrico

De acordo com BERLATO e GONÇALVES (1978); BRUNINI et alii (1982); e SEGOVIA e ANDRADE (1982), a penalização pelo déficit hídrico pode ser obtida por meio da seguinte equação:

$$Penal = \frac{ETR}{ETM} \quad (\text{eq.07})$$

em que

ETR = Evapotranspiração real da cultura, mm.d⁻¹; e

ETM = Evapotranspiração máxima da cultura (HARGREAVES, 1994), mm.d⁻¹.

2.3.5. Equação do estágio de desenvolvimento

O cálculo do estágio de desenvolvimento é obtido empregando-se as seguintes equações:

Da sementeira até o florescimento.

$$ED = \frac{gd}{709} \quad (\text{eq.08})$$

em que

ED = Estádio de desenvolvimento da cultura, adimensional;

gd = Graus-Dias acumulados, °C; e

709 = Graus-Dias acumulados para atingir o florescimento, °C.

Do florescimento até à maturação.

$$ED = \frac{(gd - 709)}{(1472 - 709)} + 1 \quad (\text{eq.09})$$

em que

1472 = Graus-Dias acumulados para atingir a maturação, °C.

2.3.6. Equação do índice de área foliar

O IAF foi calculado através da multiplicação do peso da folha (partição diária de carboidratos para a folha, em $\text{Kg}(\text{CO}_2).\text{Kg}(\text{MS})^{-1}.\text{d}^{-1}$) pela área foliar específica e pelo fator de penalização, que é função do défice hídrico, empregando-se a equação

$$IAF = PART_LEAF.AFE.PENAL_AGUA \quad (\text{eq.10})$$

em que

IAF = Índice de área foliar, $\text{m}^2\text{folha}.\text{m}^{-2}\text{área de solo}$;

PART_LEAF = Peso da folha, $\text{kg}.\text{m}^{-2}$; e

AFE = Área foliar específica, $\text{m}^2\text{folha}.\text{kg}^{-1}$; e

PENAL_AGUA = Penalização pelo défice hídrico, adimensional.

As demais equações que compõem o modelo e seus respectivos parâmetros são apresentadas no Apêndice C.

3. SIMULAÇÃO DA INTERAÇÃO CLIMA-CULTURA DA SOJA

3.1. Temperatura

3.1.1. Introdução

A temperatura influencia diretamente todas as fases da cultura, ou seja, os processos de germinação, crescimento, floração e enchimento de grãos, bem como a respiração, fotossíntese e absorção de água e nutrientes (BERLATO, 1981).

Em relação à temperatura, pode-se considerar que os primeiros estudos sobre a interação clima-planta, disponíveis na literatura, foram realizados há 262 anos por REAMUR (1968), após o desenvolvimento de sua escala termométrica. Este pesquisador observou que o somatório das temperaturas médias diárias, relativas aos meses de abril, maio e junho, era praticamente constante de ano para ano, para o desenvolvimento de qualquer planta. Baseado nestas observações, ele concluiu que este somatório expressava a quantidade de energia que as plantas necessitavam para atingir a maturidade. Assim, Reamur foi o precursor no uso de Graus-Dia, utilizado até o momento, para a previsão do tempo de duração do ciclo fenológico das culturas.

3.1.2. Efeito da temperatura sobre o crescimento e o desenvolvimento da soja

O ângulo de incidência de luz, o nível de umidade, o albedo, o vento, a cobertura de nuvens, a estação do ano e a latitude afetam a temperatura da planta.

Segundo WHIGHAM e MINOR (1978), tanto a temperatura do ar quanto a do solo exercem influência sobre processos como a respiração, transpiração e outros.

A soja é uma cultura que, durante a fase de germinação, necessita de temperatura do solo em torno de 30°C, para alcançar uma taxa de germinação satisfatória. Segundo Brow, citado por CAMARGO et alii (1971), na maioria das regiões tropicais, essas temperaturas são possíveis na época de plantio, porém, raramente são alcançadas nos solos de regiões temperadas.

Para MOTA (1994), o menor tempo de germinação da soja, em condições favoráveis, é obtido em temperaturas do solo a 30°C, enquanto é necessário o dobro do tempo em temperatura do solo de 20°C. Segundo Hatfield e Egli, citados por GAZZONI (1994), a temperatura ótima do solo para a germinação está na faixa de 25 a 30°C, sendo que a temperatura de 40°C já se encontra próxima ao valor máximo possível para a germinação.

SEDIYAMA et alii (1993) relatam que temperaturas do ar de 18°C, ou menores, não permitem a formação de vagem. O tamanho da semente foi maior quando as plantas eram cultivadas a 27°C e o número de vagens por planta foi maior a 30°C. Temperaturas abaixo de 24°C, normalmente, retardarão o florescimento por dois a três dias, para cada decréscimo de 0,5°C. A indução floral é bastante inibida a temperaturas inferiores ou iguais a 10°C. Na região central dos EUA, a indução floral é acelerada quando as temperaturas médias aumentam de 15 para 32°C. Temperaturas acima de 40°C têm efeito adverso sobre a taxa de formação do nó, a taxa de crescimento do entrenó e a iniciação floral. Embora a taxa de crescimento decline altas temperaturas, a soja tem melhor tolerância a altas temperaturas do que culturas como o milho.

Dessa forma, evidencia-se a influência das temperaturas do solo e do ar sobre o crescimento e desenvolvimento da cultura. Devido à maior facilidade de obtenção dos dados e à maior influência dessas temperaturas ao longo de todo o ciclo da cultura, a temperatura do ar será considerada, neste trabalho, como um dos elementos climáticos que participam do modelo desenvolvido.

3.1.3. A temperatura e os modelos

O grupo de maturação de uma variedade de soja é determinado pelo desvio em dias, a partir de uma variedade padrão, ou, mais precisamente, expressa pelo número de dias transcorridos do plantio até a maturidade. Este número é uma média de registros feitos ao longo dos anos. As médias podem explicar uma comparação válida para estas variedades; todavia, é necessário um período mais longo sob condições de dias frios e longos do que um período mais curto sob condições de dias quentes e curtos, para a soja completar o seu ciclo.

Quando há possibilidade de estabelecer uma correlação adequada entre os elementos do clima e o desenvolvimento da soja, a estação de crescimento para cada variedade poderá ser definida com base nesses fatores do tempo (BROWN, 1960).

Desse modo, nos estudos da produtividade não se pode prescindir da análise de desenvolvimento, na qual a temperatura é um dos fatores físicos intervenientes do ambiente, atuando diretamente sobre as culturas.

Assim, a temperatura torna-se um dado climático bastante utilizado em trabalhos com modelagem de culturas, influenciando alguns componentes do modelo de maneira a afetar a produtividade final.

JOHNSON e THORNLEY (1983) desenvolveram um modelo para a grama, no qual assume-se que a área foliar específica (AFE) é uma função empírica da temperatura e da quantidade de luz recebida pela planta.

Em outro modelo, desenvolvido por BROWN (1960) para a cultura da soja, foi verificado o número de dias necessários para o florescimento de duas

variedades de soja. Dados foram registrados a partir de estudo feito em câmaras de crescimento com clima controlado. Estes dados permitiram a derivação de uma relação temperatura-desenvolvimento para a soja.

3.1.4. A temperatura no SOYCLIMA

No presente modelo, o elemento climático temperatura do ar apresenta-se como um dos dados de entrada.

De acordo com PENNING DE VRIES et alii (1989) e CHANG (1971), a temperatura média do ar afeta a Taxa de Respiração de Manutenção e a Fotossíntese Máxima realizada pela cultura, conforme as equações abaixo:

$$TRM_TOT = rm30 \cdot Q10 \frac{media - T_REF}{10} \quad (eq.11)$$

em que

TRM_TOT = é a taxa de respiração de manutenção total, $kgCO_2 \cdot Kg_{(ms)}^{-1} \cdot d^{-1}$;

rm30 = a taxa da referência da respiração de manutenção da planta a temperatura de 30°C, $0,06 kgCO_2 \cdot kg_{(ms)}^{-1} \cdot d^{-1}$;

Q10 = a taxa de reação a um aumento de 10°C de temperatura, adimensional;

média = a temperatura média diária, em °C; e

T_REF = a temperatura de referência utilizada para a cultura, 30°C.

$$Fmax = fm30 \cdot \frac{media - tb}{30 - tb} \quad (eq.12)$$

em que

Fmax = fotossíntese máxima realizada pela planta sem restrição nenhuma, $kgCO_2 \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$;

fm30 = taxa de fotossíntese máxima realizada pela planta a 30°C, $0,052 kgCO_2 \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$; e

tb = temperatura-base, 10°C.

Levando-se em consideração o uso de acúmulo de temperatura (graus-dias ou unidades térmicas) em estudos sobre a cultura da soja e outras culturas, os modeladores têm utilizado, universalmente, o conceito unidade térmica.

Este conceito baseia-se em observações segundo as quais a temperatura é o principal fator que influencia os estádios de crescimento das plantas. Implícito em tal consideração está o fato de que a resposta das plantas à temperatura está restrita aos limites inferior (temperatura-base) e superior (temperaturas além das quais as plantas não se desenvolvem) (MOTA et alii, 1973).

Assim, considera-se que as temperaturas máxima e mínima ocorridas ao longo do dia são parâmetros da equação de cálculo dos Graus-Dias Acumulados, que segundo CHANG (1971) pode ser calculado pela seguinte equação:

$$GD = \frac{\textit{maxima} + \textit{minima}}{2} - tb \quad (\text{eq.13})$$

em que

GD = Graus-Dias acumulados pela planta, °C.d⁻¹;

máxima = temperatura máxima ocorrida durante o dia, °C; e

mínima = temperatura mínima ocorrida durante o dia, °C

3.1.5. Resultados e discussão

A temperatura exerce influência sobre todas as fases do ciclo da cultura, de acordo com Marcos Filho et alii (1982), citados por CÂMARA (1991). Assim, o modelo foi testado visando avaliar a influência da temperatura ao longo do ciclo da cultura e, conseqüentemente, avaliar seu efeito sobre a produção final. Para isso, executou-se o modelo com a data de plantio de 15 de novembro, que é a data mais utilizada para o plantio da soja na região em estudo, com as temperaturas variando de ±0,5°C e ±1°C em torno da temperatura média (Normal Climatológica) para este mês e os subseqüentes.

Observou-se que menores temperaturas implicam em maiores períodos vegetativos. Para decréscimo de 1°C na temperatura, há um atraso de três dias no início do florescimento (Quadro 3), o que está de acordo com o resultado encontrado por Garner e Allard (1930), citados por GANDOLFI e MULLER (1981).

Quadro 3 - Número de dias necessários para ocorrer o início do florescimento (Dias Após o Plantio, DAP) em função de variações de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ e $\pm 1^{\circ}\text{C}$ na temperatura em torno da temperatura média (Normais Climatológicas) para a localidade de Capinópolis, MG

Temperatura	-1°C	-0,5°C	Média	+0,5°C	+1°C
Florescimento (DAP)	51	50	48	47	45

Na Figura 1 observa-se que, para maiores temperaturas, as plantas atingiram mais rapidamente seu máximo valor de IAF. No entanto, estes valores foram menores quando comparado aos IAF's das plantas que experimentaram menores temperaturas.

Observou-se um aumento inicial mais acentuado no IAF para os valores de temperatura superiores ao normal, reduzindo-se logo em seguida. Para menores valores de temperatura o aumento do IAF foi menos acentuado no início, todavia foram os que atingiram valores mais altos.

Na Figura 2, observa-se que maiores valores de temperatura induziram a maiores taxas de fotossíntese líquida, ou seja, em tal situação a cultura antecipou em torno de 10 dias o seu máximo de fotossíntese. No entanto, observa-se que a diferença entre o menor e o maior valor não foi muito significativa, alcançando diferenças da ordem de 2,03%, enquanto variações na temperatura afetaram em 10,9% a área de captura da planta (IAF).

Observou-se, também, que os valores da produtividade de grãos foram reduzidos, para temperaturas menores e, praticamente, não variaram para temperaturas maiores (Quadro 4). Por outro lado, a matéria seca final aumentou com a redução da temperatura.

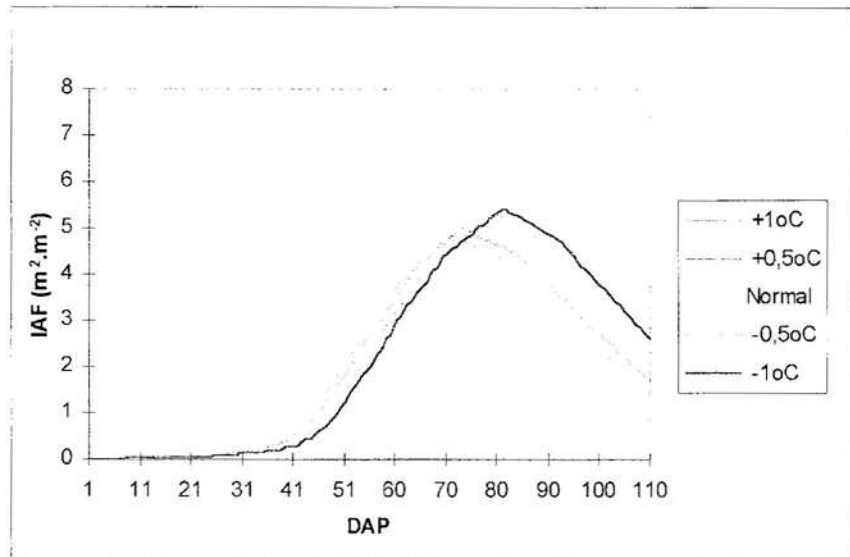


Figura 1 - Valores do índice de área foliar (IAF), em $m^2.m^{-2}$, em função de dias transcorridos após o plantio (DAP), para variações $\pm 0,5^\circ C$ e $\pm 1^\circ C$ na temperatura em relação à média (Normais Climatológicas) ao longo do período estudado, para a localidade de Capinópolis.

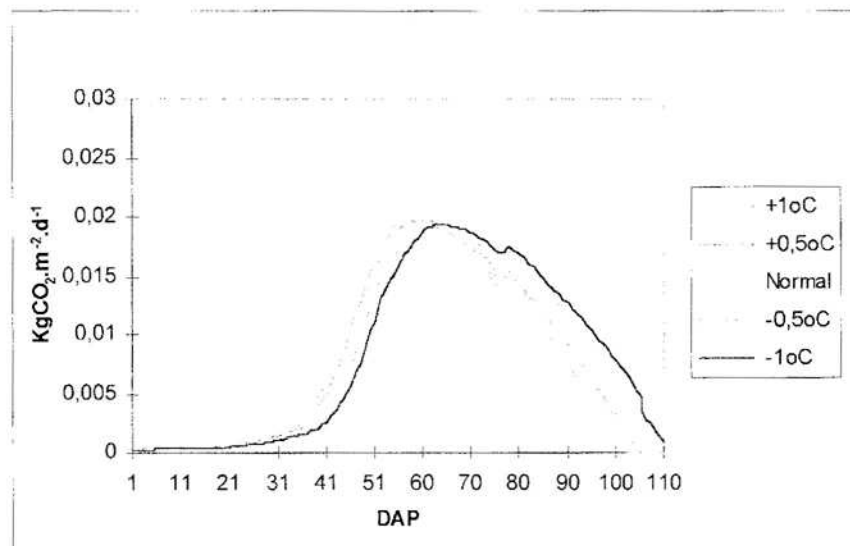


Figura 2 - Valores de fotossíntese líquida, em $kg(CO_2).m^{-2}.d^{-1}$, em função de dias transcorridos após o plantio (DAP), para variações de $\pm 0,5^\circ C$ e $\pm 1^\circ C$ na temperatura em relação à média (Normais Climatológicas) ao longo do período estudado, para a localidade de Capinópolis.

Quadro 4 - Variação da matéria seca de grãos e matéria seca final, em kg.ha⁻¹, e índice de colheita (IC), em %, em função da variação de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ e $\pm 1^{\circ}\text{C}$ na temperatura em relação à média (Normais Climatológicas) ao longo do período estudado, para a localidade de Capinópolis

Temperatura	-1°C	-0,5°C	Média	+ 0,5°C	+1°C
Grãos	2.590	2.660	2.700	2.700	2.720
MS_Final	8.880	8.590	8.590	8.420	8.210
IC	29,1	30,2	31,4	32,3	33,1

O Índice de Colheita (IC), que é uma medida de eficiência de partição de fotoassimilados, e que proporciona melhores informações para compreensão das bases fisiológicas das diferenças de rendimento tanto entre cultivares diferentes como dentro de uma mesma cultivar plantada em épocas diferentes, não apresentou grande variação, e, sempre aumentou a partir de variações de valores de -1°C até $+1^{\circ}\text{C}$, o que representa um maior rendimento relativo para a cultura em situações de maior disponibilidade de temperaturas (Quadro 4).

3.1.6. Conclusões

De acordo com os resultados apresentados, observou-se que dentro dos limites estudados à medida que a temperatura aumentou ocorreu redução no IAF e aumento na fotossíntese líquida. Para uma redução nos valores de temperatura de $-0,5^{\circ}\text{C}$ a -1°C , em relação à média (Normal Climatológica), ocorreu uma redução de 3,9% e 5,7% respectivamente nos valores do IAF, e, uma redução de apenas 1,02% na fotossíntese líquida para a redução de -1°C , não ocorrendo redução quando a temperatura foi reduzida em $-0,5^{\circ}\text{C}$; tal fato induz à conclusão que a variação de temperatura, dentro deste limite, teve grande efeito na partição de fotoassimilados.

Foi observado que os maiores valores de matéria seca ocorreram em menores temperaturas. Todavia, pode-se concluir que tal fato não representou um aspecto positivo, uma vez que os ganhos de matéria seca não refletiram em maior produção de grãos (produto rentável da soja). Tais resultados

refletiram-se na análise do índice de colheita (IC), em que verificou-se que o menor IC ocorreu para menores valores de temperatura, enquanto o maior ocorreu para o maior valor de temperatura, sendo que as diferenças entre o menor e o maior valor do IC alcançado em relação ao valor médio (Normais Climatológicas) foram 7,3% e 5,4%, respectivamente.

Resumindo, os resultados obtidos do modelo indicaram que, mantendo-se todos os outros elementos climáticos com valores médios (Normais Climatológicas) e provocando aumentos na temperatura média em torno de 1°C, na região de Capinópolis, ocorreria um aumento no índice de colheita da ordem de 5,4% (Quadro 4).

3.2. Radiação solar e fotoperíodo

3.2.1. Introdução

Conforme citado por CURRY et alii (1975), a radiação é um dos elementos meteorológicos mais importantes para as culturas, sendo o principal elemento climático na realização da fotossíntese. A quantidade de luz disponível para a planta pode ser alterada por alguns fatores, tais como o ângulo de incidência, sombreamento competitivo, nuvens, nevoeiro e outras condições impostas pelo ambiente.

Do total de radiação incidente sobre uma planta, somente uma parte conhecida como Radiação Fotossinteticamente Ativa (RFA) é utilizada no processo fotossintético. Assim, dependendo da arquitetura, pode ocorrer maior ou menor penetração dessa radiação no dossel vegetativo.

3.2.2. Fotoperíodo

A soja é conhecida como planta de dias curtos. Isto se explica porque a soja depende do período de luz disponível ao longo do dia, fator este que regula a época de floração da soja. Dessa forma, a soja floresce quando os dias começam a diminuir, portanto, ela é influenciada pelo fotoperíodo, que

influencia diretamente os estádios fenológicos da cultura e, conseqüentemente, o rendimento final da mesma (MOTA, 1994).

O fotoperíodo pode ser definido, também, como a duração do dia em horas de brilho solar. O fotoperíodo varia com a latitude, se for considerada uma mesma época do ano, ou, com época do ano para uma mesma latitude.

Segundo GAZONNI (1994), a soja é uma cultura considerada extremamente sensível ao fotoperíodo, sendo que diferentes variedades apresentam diferentes valores de fotoperíodo crítico. Dessa forma, uma determinada variedade é induzida ao florescimento, quando encontra-se em fotoperíodos iguais ou inferiores ao crítico por ela exigido. Por esta razão, é denominada planta de dias curtos, embora seja a duração do período escuro o fator que realmente determina seu florescimento.

O fotoperíodo é tão importante que foi constatada a influencia direta na determinação da proporção relativa entre os períodos vegetativos e reprodutivos, bem como no período de florescimento até a formação de vagens, e daí até a maturação, no número de nós e altura da planta (SEDIYAMA et alii, 1993).

3.2.3. Efeito da radiação solar sobre o crescimento e desenvolvimento da soja

A curva da fotossíntese máxima realizada pela cultura da soja, determinada por vários pesquisadores, ocorre para valores de radiação entre 15,8 MJ.m⁻² e 18,6 MJ.m⁻². Dois picos na atividade da fotossíntese ocorrem durante o ciclo da cultura, isto é, um no período de florescimento e outro no período de enchimento de grãos. Podem ocorrer grandes diferenças nas taxas fotossintéticas entre as diferentes variedades. Tal fato constitui um dos fatores que explica a diferença de produtividade entre variedades. No entanto, estudos têm mostrado que o rendimento de sementes não correlacionou com a produção de matéria seca, indicando que seria desejável o estímulo da partição de fotoassimilado para os grãos, em vez do crescimento vegetativo (SEDIYAMA et alii, 1993).

Além de seu efeito na fotossíntese, a radiação representa a energia necessária para os processos de evapotranspiração (YAOK e SHAW, 1964).

Segundo MONSI e SAEKI (1953), no interior da cultura, a radiação líquida de onda curta transmitida pode ser expressa como uma função exponencial tanto do índice de área foliar como do coeficiente de extinção da mesma. Resultados como este alertam sobre a importância do IAF na distribuição percentual do total da luz que incide sobre uma comunidade de plantas.

BRITTON e DODD (1976) destacam a importância do conhecimento da RFA para a análise de crescimento de plantas e para a avaliação da eficiência de conversão da energia solar em energia química.

A utilização da energia solar depende do nível dos fatores do meio ambiente, tais como água, CO₂ e nutrientes minerais, bem como da distribuição de luz no interior da planta; este último pode ser manipulado por técnicas agrônômicas como o espaçamento e a densidade populacional. Entretanto, tais práticas não alteram o arranjo espacial das folhas dentro do dossel (SHIBLES e WEBER, 1966). Portanto, para aumentar a taxa fotossintética e, conseqüentemente, a produtividade final, uma das possibilidades consiste em elevar os níveis dos fatores limitantes do meio ambiente.

3.2.4. A radiação e os modelos

A radiação é um elemento climático presente em todos os modelos de simulação de culturas, pois, para a planta realizar o processo de conversão de CO₂ e H₂O em carboidratos (fotossíntese), é necessária a presença deste elemento.

No modelo SOYMOD I, desenvolvido por CURRY et alii (1975), a equação básica utilizada foi desenvolvida por MONTEITH (1965), que baseou-se em seu próprio trabalho e no de GAASTRA (1959), segundo o qual a interceptação de luz é função de interceptação de luz em sucessivas camadas

horizontais de folhas. Tal equação foi, também, utilizada com relativo sucesso para o milho (CURRY e CHEN, 1971).

No modelo SOYGRO V5.42, além de ser um componente da equação da fotossíntese, a radiação é também um fator componente no cálculo da evapotranspiração. Para tal fim, além da radiação, são utilizadas informações de albedo, temperatura média diária e temperaturas máxima e mínima (Jones e Kiniry, 1986, citados por JONES e RITCHIE, 1990).

3.2.5. A radiação e fotoperíodo no SOYCLIMA

Em razão da fotosensibilidade, as variedades de soja geralmente são adaptadas a estreitas faixas de latitude. Por exemplo, uma variedade de soja adaptada para as condições de 30°S, quando cultivada em 40°S, florescerá tardiamente, resultando em um maior ciclo da planta.

Como neste trabalho o modelo é considerado em uma faixa de latitude bastante estreita e, não havendo no período de plantio até a maturidade (em torno de 120 dias) uma variação superior a 1:39h no período de duração do dia, por uma questão de simplicidade não será considerada a influência do fotoperíodo na cultura, enquanto a radiação será considerada como dado de entrada no presente modelo.

Do total da radiação recebida pela planta, somente uma parte, que é conhecida como radiação fotossinteticamente ativa (RFA) e constitui um dos componentes para o cálculo da fotossíntese bruta, é utilizada nos processos fotossintéticos. Esta radiação pode ser obtida de acordo com PENNING DE VRIES et alii (1989) pela seguinte equação:

$$RFA = radiação.0.5 \quad (eq.14)$$

em que

RFA = Radiação fotossinteticamente ativa, MJ.m⁻²; e

radiação = radiação incidente na planta, MJ.m⁻².

A radiação é também um elemento climático componente da equação do cálculo da Evapotranspiração de Referência (Eto) influenciando, assim, o

resultado que irá penalizar a cultura em função do déficit hídrico, no qual a Eto é componente fundamental.

3.2.6. Resultados e discussões

De acordo com as considerações apresentadas, o modelo foi executado visando avaliar a influência da radiação ao longo do ciclo da cultura e, conseqüentemente, avaliar a produtividade final em função da radiação disponível. Para isso, executou-se o modelo iniciando no dia 15 de novembro e variaram-se os níveis de radiação disponível em $\pm 20\%$ e $\pm 40\%$, em relação aos valores normais para a região em estudo.

Com relação ao IAF, observou-se que à medida que aumentou a disponibilidade de luz, a partir de -40% em relação à disponibilidade de luz média (Normal Climatológica) da região, o IAF também aumentou, sendo que o acréscimo relativo foi maior para valores inferiores à média do local (Figura 3).

Outro fato observado é que, embora tenha ocorrido diferença entre os valores máximos de IAF mediante a variação da radiação, a diferença em dias para que ocorressem os maiores valores de IAF foi mínima, não chegando a ultrapassar dois dias.

Observou-se que para um aumento a partir de -40% na radiação disponível, houve um acréscimo na fotossíntese líquida. O aumento foi mais acentuado para os valores menores do que os médios (Normais Climatológicas), reduzindo-se em seguida para aumentos acima dos valores médios (Normais Climatológicas) (Figura 4). Resultados semelhantes foram encontrados por BURNSIDE e BOHNING (1957); BRUN e COOPER (1967); BOWES et alii (1972); SINGH et alii (1974); e CROOKSTON et alii (1975).

Maiores índices de radiação disponível causaram, também, uma redução nos dias necessários para a cultura alcançar seu máximo valor de fotossíntese. A diferença, em dias, entre o menor e o maior valor máximo alcançado foi dez dias.

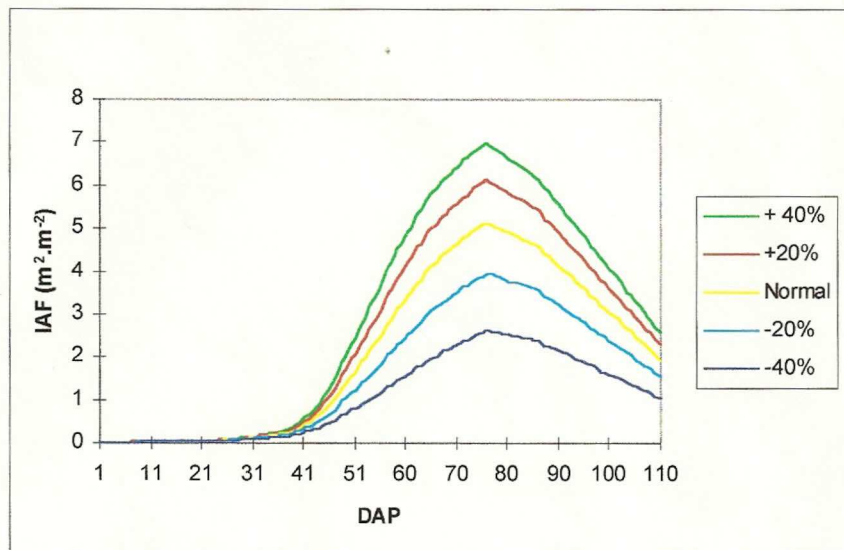


Figura 3 - Valores do índice de área foliar, em $m^2.m^{-2}$, em função de dias transcorridos após o plantio (DAP), para variações de $\pm 20\%$ e $\pm 40\%$ na radiação em relação à média (Normais Climatológicas) ao longo do período estudado, para a localidade de Capinópolis.

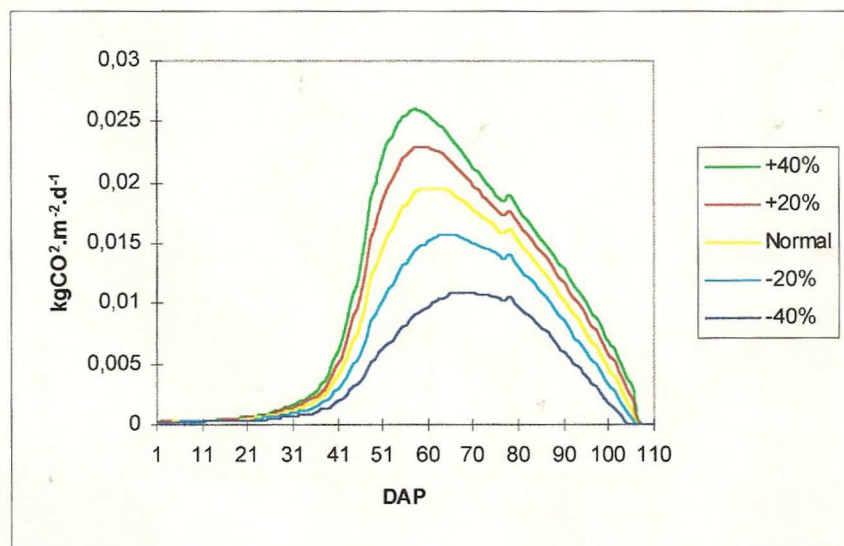


Figura 4 - Valores de fotossíntese líquida, em $kg(CO_2).m^{-2}.d^{-1}$, em função de dias transcorridos após o plantio (DAP), para variações de $\pm 20\%$ e $\pm 40\%$ na radiação em relação à média (Normais Climatológicas) ao longo do período estudado, para a localidade de Capinópolis.

Outro fato observado foi a redução nas produções de grãos e de matéria seca (Quadro 5), concomitantemente com a redução nos níveis de radiação disponível para a planta. Resultados semelhantes foram encontrados por SCHOV et alii (1978); WAHUA e MILLER (1978); e TRANG e GIDDENS (1980). A diferença entre a matéria seca de grãos para valores de radiação de -20% e -40%, em relação a normal, foi 18,5% e 43,7%, respectivamente, o que representou um decréscimo acentuado da matéria seca dos grãos para os menores valores de radiação disponível.

Quadro 5 - Variação da matéria seca final e dos grãos, em Kg.ha⁻¹, e do índice de colheita (IC), em %, em função da variação de ±20% e ±40% da radiação solar em relação à média (Normais Climatológicas) ao longo do período estudado, para a localidade de Capinópolis

Radiação	-40%	-20%	normal	20%	40%
Grãos	1.520	2.200	2.700	3.100	3.240
MS_Final	4.650	6.830	8.590	10.020	11.230
IC	32,6	32,2	31,4	30,9	28,8

Ainda com base nas informações apresentadas no Quadro 5, observa-se que os valores de IC não apresentaram variação acentuada e que os mesmos aumentaram sempre à medida que diminuía a radiação disponível, sendo que o maior valor alcançado foi de 32,6%, o que representou um maior rendimento de grãos, em relação à produção total de matéria seca.

3.2.7. Conclusões

A partir dos resultados analisados, tomou-se como exemplo um aumento de 40% na radiação disponível para a planta, verificando-se que, para este aumento, o IAF aumentou em 26,6% em relação ao valor normal enquanto a fotossíntese líquida aumentou 30,7%.

Portanto, pode-se concluir que a variação da radiação dentro do limite estudado influenciou mais os componentes fisiológicos (utilização da radiação) da cultura da soja do que os componentes morfológicos (captura da radiação).

Observou-se, também, que à medida que aumentou a radiação disponível, o IAF aumentou e, também, aumentou a fotossíntese líquida, ou seja, à medida que os órgãos de captura crescem, ocorre também um aumento na utilização da luz.

Observou-se, também, que os maiores valores de matéria seca foram alcançados com maior disponibilidade de radiação, sendo este fato verdadeiro também para os grãos.

Verificou-se que o maior rendimento relativo, representado pelo índice de colheita (IC), ocorreu para os menores valores de radiação, não havendo grande diferença entre o IC alcançado para os valores normais de radiação e os maiores valores de radiação disponível, sendo esta diferença correspondente a 8,2%.

3.3. Umidade do solo

3.3.1. Introdução

O fator disponibilidade da água no solo é determinante para diversas culturas. Na cultura da soja, a importância da disponibilidade de água começa desde a germinação. Uma condição de seca ou de excesso de umidade, na época da sementeira, poderá ser prejudicial, uma vez que o processo de germinação inicia-se com a embebição, fase em que a semente deve conter pelo menos 50% de seu peso em água, sendo, pois, mais exigente do que a maioria das culturas (SEDIYAMA et alii, 1993).

Considerando que, na produção da soja, a água frequentemente é o fator limitante primário, o seu manejo merece atenção especial. Existem duas fontes de água disponível para a soja, sendo uma natural ou precipitação e a outra artificial ou irrigação.

A precipitação ainda é a principal fonte de água para a maioria das culturas, o mesmo ocorrendo com a soja, uma vez que só existe um pequeno número de propriedades com culturas irrigadas.

3.3.2. Efeito da umidade sobre o crescimento e desenvolvimento da soja

Em relação às necessidades hídricas, a soja é uma cultura que apresenta uma série de períodos críticos ao longo do seu desenvolvimento.

Segundo SALINAS et alii (1989), a soja apresenta dois períodos críticos bem definidos, em relação às necessidades hídricas. Tais períodos normalmente ocorrem durante o plantio até a emergência e durante o enchimento de grãos. Durante a germinação, tanto o déficit quanto o excesso de umidade é prejudicial para a distribuição uniforme e o número de plantas por área.

Para RUNGE e ODELL (1960), a deficiência de umidade (estresse hídrico) tem maior influência durante o rápido crescimento vegetativo e no período de enchimento de grãos.

Slow e Laing (1966), citados por MEDERSKI et alii (1973), encontraram que o efeito do estresse de umidade durante o florescimento foi menor do que nos estádios mais tardios do desenvolvimento e enchimento dos grãos, havendo, contudo, redução no rendimento de grãos em relação as plantas não sujeitas ao estresse. Durante o florescimento e desenvolvimento de vagem, este estresse parece ser também o responsável pelo aborto de flores e vagens enquanto, durante o enchimento de grãos, ele reduz o tamanho da semente. Tais resultados foram também encontrados por DOSS et alii (1974); SIONIT e KRAMER (1977) e SEDIYAMA et alii (1993).

Segundo BARNI e COSTA (1975), os danos ocasionados pelo excesso de água no solo associam-se à duração do período de inundação e ao estágio do desenvolvimento da planta.

O excessivo teor de umidade no solo restringe, drasticamente, a germinação e o crescimento inicial da soja. Estes efeitos são, aparentemente, o resultado da restrita disponibilidade de oxigênio para a semente e raízes da

planta. Em campos mal drenados, caracterizados por longos períodos de encharcamento e formação de densas crostas, observa-se redução no povoamento e praticamente paralisação no crescimento, após a seca (SEDIYAMA et alii, 1993).

Uma vez que o crescimento da soja é proporcional ao suprimento de umidade, existe uma correlação positiva entre a altura, o número de nós, o diâmetro do colo, o número de flores, a percentagem de vagens viáveis, o número e o peso dos grãos e o conteúdo de umidade do solo, principalmente quando ocorrem extremos de umidade ou de seca (MOTA, 1994).

O longo período de florescimento e o extenso sistema radicular da soja favorecem sua resistência a curtos períodos de estresse hídrico. Um curto período de déficit, durante o período de enchimento de grãos, provoca maior redução da produtividade do que quando o déficit ocorre em períodos anteriores, inclusive no estágio de florescimento (MOTA, 1978).

Para que ocorra um máximo de produtividade, é necessário que certo suprimento de águas esteja disponível durante os períodos críticos de desenvolvimento, proveniente de precipitações freqüentes, armazenamento no solo ou irrigação.

O conhecimento do total de água necessário à cultura, ao longo dos estágios de desenvolvimento, possibilita adotar técnicas, tais como o ajuste das datas de plantio, de acordo com o conhecimento do clima local, de modo que os períodos críticos para a cultura coincidam com os períodos nos quais não haja déficit ou excesso de água para a cultura.

A perda de água no solo é uma função conjunta da disponibilidade de energia na atmosfera, que é responsável pela evaporação do solo e transpiração das plantas e suprimento de água disponível no solo. Esta relação pode ser expressa pelo denominado índice "R", razão da evapotranspiração real (ETR) e pela evapotranspiração potencial (ETM), em que "ETR" está ligada ao suprimento de água, e "ETM" à necessidade de água da planta. Dessa forma, pode-se afirmar que o índice "R" é uma medida do suprimento hídrico para a planta em relação às necessidades da mesma (YAO, 1969).

3.3.3. A umidade e os modelos

A precipitação pluvial é o elemento meteorológico mais utilizado nos modelos de previsão. Sua utilização em modelos de produtividade, para a cultura da soja, ocorre há vários anos (THOMPSON, 1970).

Assim, ao longo dos anos diversos pesquisadores vêm lançando mão deste elemento meteorológico na execução de modelos. ARRUDA et alii (1977) correlacionaram as precipitações ocorridas nos diferentes períodos do ciclo da cultura da soja e chegaram à conclusão que seria possível fazer previsão da produção de grãos com certa precisão, analisando as precipitações acumuladas a partir da segunda quinzena de janeiro até meados de fevereiro.

Outro exemplo seria o modelo desenvolvido por WILLIAMS e ROBERTSON (1965) que, a partir de dados de precipitação pluvial obtidos durante o período vegetativo, conseguiram estimar a produção de trigo para o Canadá.

Em seguida, WILLIAMS (1969 e 1973) conseguiu desenvolver modelos que, além da precipitação pluvial, consideravam a evapotranspiração potencial e, dessa forma, melhoraram consideravelmente os resultados obtidos.

SEGOVIA e ANDRADE (1982) desenvolveram um modelo segundo o qual a produtividade máxima da cultura seria penalizada à medida que a umidade do solo afastasse do considerado ideal. Dessa forma, os cientistas buscavam explicar as variações ocorridas na produtividade das culturas, considerando apenas os valores de precipitação pluvial. Assim, tal modelo permitia estimar, a partir da precipitação pluvial, as variações na safra para determinada cultura.

Referência mais recente é o modelo SOYGRO V5.42, que avalia a disponibilidade diária de água para os cultivos considerando a transpiração da planta e a evaporação do solo. Este modelo é uma adaptação do modelo de água no solo, descrito por JONES e RITCHIE (1990) para o modelo da cultura do trigo.

Existem ainda outros modelos, tais como o GLYCIM desenvolvido por Acock et alii (1993), citado por JONES e RITCHIE (1990), o REALSOY

desenvolvido por MEYER e RITCHIE (1980), o SOYMOD desenvolvido por CURRY et alii (1975) que consideram o balanço de umidade no solo, verificando a quantidade de água disponível para a cultura a fim de estimar a sua produtividade, ainda que sob condições limitantes de água.

3.3.4. A umidade no SOYCLIMA

No presente modelo, o elemento hídrico entra como um fator que penaliza a produção de carboidratos, através de seu efeito na fotossíntese, e a taxa de expansão foliar.

Neste trabalho, o efeito do estresse hídrico deriva da razão entre a evapotranspiração real (ETR) e a evapotranspiração potencial da cultura (ETM), ao longo do ciclo da mesma.

A consideração feita em torno dessa relação é que, um resultado inferior a 1, indica que a cultura está sendo submetida a um estresse hídrico e que quanto menor for o valor, maior será o estresse experimentado pela planta, ou seja, a produção de matéria seca e a expansão foliar serão penalizadas em função do valor resultante dessa relação BERLATO e GONÇALVES (1978); BRUNINI et alii (1982); e SEGOVIA e ANDRADE (1982).

Então temos que:

$$Penal = \frac{ETR}{ETM} \quad (eq.15)$$

3.3.5. Resultados e discussão

Vários estudos apontam o fator disponibilidade hídrica como um dos mais importantes para a determinação do rendimento final da cultura, influenciando todas as fases e seu ciclo; SCOTT e ALDRICH, 1970; BERLATO e BERGAMASCHI, 1978; GARCIA, 1979; TORRES, 1981; CAMARGO, 1984.

Assim, o modelo foi testado visando avaliar a influência da disponibilidade hídrica ao longo do ciclo da cultura e na produtividade. Para isso, executou-se o modelo para o dia 15 de novembro enquanto os valores de precipitação, que representam a umidade disponível para a planta, foram variados em $\pm 20\%$ e $\pm 40\%$ em relação às normais da região em estudo.

Verificou-se que o aumento da umidade disponível para a planta, acima do valor normal para a região, não provocou variação no valor final da matéria seca. A única variação para a matéria seca final ocorreu quando a umidade foi diminuída em 40%, reduzindo em 10,8% a matéria seca final (Quadro 6).

Quadro 6 - Variação da matéria seca final e dos grãos, em $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, e do índice de colheita (IC), em %, em função da variação de $\pm 20\%$ e $\pm 40\%$ do valor da precipitação em relação à média (Normais Climatológicas) ao longo do período estudado, para a localidade de Capinópolis

Umidade	-40%	-20%	Média	20%	40%
Grãos	2.190	2.700	2.700	2.700	2.700
MS_Final	7.660	8.590	8.590	8.590	8.590
IC	28,6	31,4	31,4	31,4	31,4

No Quadro 6 observa-se ainda que, quando foi reduzida a disponibilidade hídrica, a partir de +40% até -40% em relação à média (Normal Climatológica) da região, somente para uma redução de -40% ocorreu uma redução de 18,8% na produção de grãos. O IC variou de 28,6% para valores de -40% de umidade, representando uma variação de 8,9% em relação a média (Normal Climatológica) da região, ou seja, 31,4%.

Em relação ao déficit hídrico verificou-se que para os valores normal e acima destes não ocorreram penalizações, mas para valores abaixo ocorreram, sendo que para -20% de umidade as penalizações foram pequenas e ocorreram na fase vegetativa, enquanto para -40% de umidade ocorreu a maior penalização que abrangeu todo o ciclo da cultura (Figura 5).

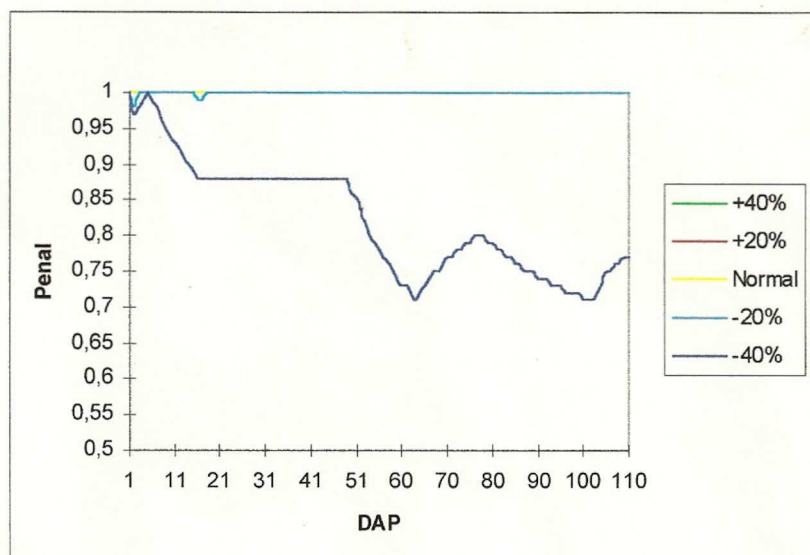


Figura 5 - Valores de penalização da fotossíntese bruta em função de dias transcorridos após o plantio (DAP), para variações de $\pm 20\%$ e $\pm 40\%$ na umidade em relação à média (Normais Climatológicas) ao longo do período estudado, para a localidade de Capinópolis.

Observou-se que a fotossíntese líquida diminuiu sempre que a disponibilidade de água era reduzida, sendo que o maior valor alcançado foi para valores de $+40\%$ de umidade. Observou-se, também, que a diferença foi muito pequena entre os valores de fotossíntese líquida, sendo que a diferença entre o menor em relação ao maior valor máximo alcançado foi $10,8\%$ (Figura 6).

De acordo com os resultados obtidos, verificou-se que somente para a redução de -40% de umidade houve uma redução de $21,6\%$ no IAF, não ocorrendo para os demais (Figura 7). Isto evidencia que a variação na umidade disponível para a cultura, dentro do limite estudado, teve maior influência sobre os componentes morfológicos da planta (IAF) do que sobre os componentes fisiológicos (fotossíntese).

3.3.6. Conclusões

De acordo com os resultados de variação da umidade disponível para a planta, observou-se que à medida que se reduziu a umidade a partir de um valor de 40% maior que o normal, até valores de -40% , os valores de IAF e

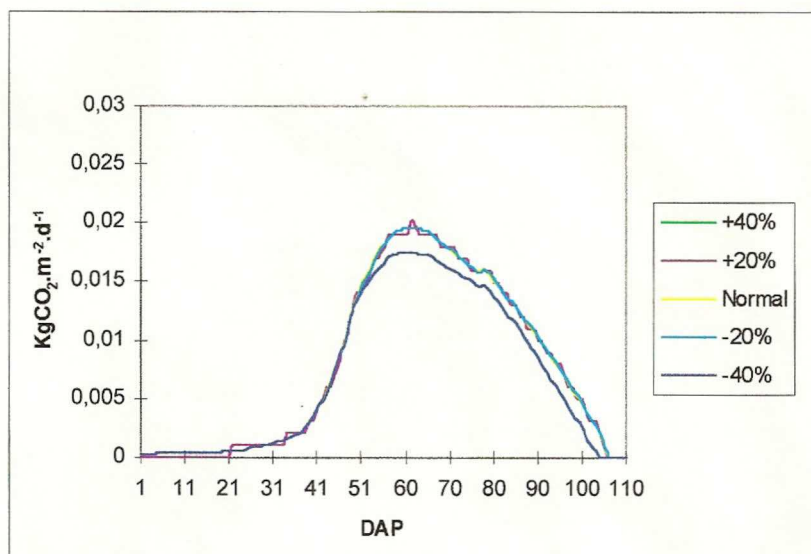


Figura 6 - Valores de fotossíntese líquida, em $\text{kg}(\text{CO}_2) \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, em função de dias transcorridos após o plantio (DAP), para variações de $\pm 20\%$ e $\pm 40\%$ na umidade em relação à média (Normais Climatológicas) ao longo do período estudado, para a localidade de Capinópolis.

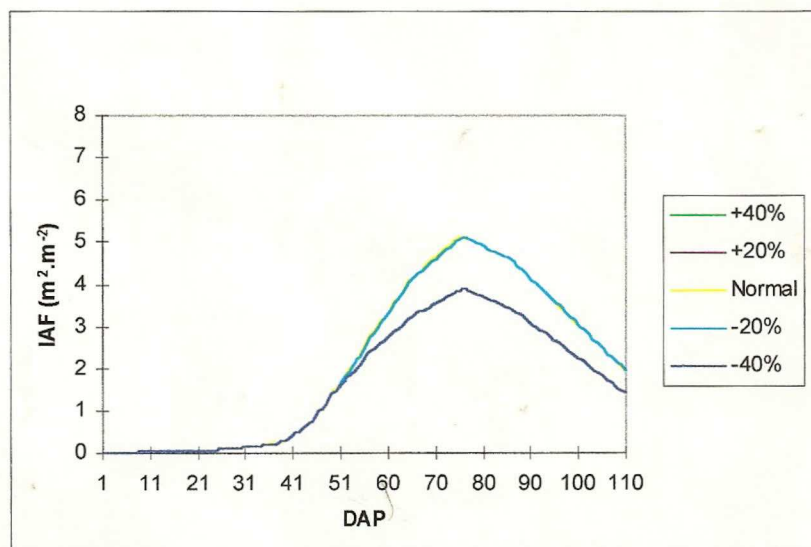


Figura 7 - Valores de índice de área foliar, em $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$, em função de dias transcorridos após o plantio (DAP), para variações de $\pm 20\%$ e $\pm 40\%$ na umidade em relação à média (Normais Climatológicas) ao longo do período estudado, para a localidade de Capinópolis.

fotossíntese líquida foram reduzidos somente para a variação de -40%. Pode-se, portanto, concluir que quanto menor a disponibilidade hídrica, menores serão os órgãos de captura e conseqüentemente menor será a taxa de utilização da radiação. No entanto, os resultados indicam que a precipitação na região não é, quantitativamente, um fator restritivo para o pleno desenvolvimento da cultura da soja.

Conforme as Figuras 6 e 7, pode-se concluir que a soja foi mais sensível à redução de valores abaixo de -20% de umidade; nesta situação, ela reduziu o valor de fotossíntese líquida e do IAF sendo, porém, mais acentuada à redução do valor de IAF. Isso significa que os elementos morfológicos foram mais sensíveis à redução de umidade do que os elementos fisiológicos.

De acordo com os dados apresentados no Quadro 6, verifica-se que embora tenha ocorrido aumento de umidade, a produção de grãos foi constante de +40% até -20%, só reduzindo em -40%. O mesmo ocorreu com a matéria seca final.

A cultura exige em torno de 450 a 825 mm de água durante o seu ciclo (PROGRAMA... - PRONI, 1987). De acordo com JENSEN (1973), a soja necessita de 400 a 560 mm de água. Logo, a normal foi suficiente para atender à demanda por parte da cultura.

3.4. Variação na data do plantio

3.4.1. Introdução

Neste tópico, será analisada a influência de todos os elementos climáticos atuando conjuntamente sobre a produtividade final da soja. Assim, o modelo foi executado para diferentes datas de plantio, ao longo dos meses de outubro, novembro e dezembro. As datas foram selecionadas com intervalos de quinze dias em torno da data considerada como a mais utilizada para o plantio, na região de Capinópolis, isto é, 15 de novembro.

3.4.2. Resultados e discussão

3.4.2.1. Índice de Área Foliar (IAF)

As variações do IAF, a partir da emergência, da cultura da soja para as diferentes datas de plantio, são ilustradas na Figura 8. As plantas de soja semeadas em 1º e 15 de dezembro apresentaram um aumento mais lento até atingir IAF com valor 3, e a partir daí superaram as demais, chegando a alcançar o maior valor IAF, ou seja, 5,5. Estas datas proporcionaram, também a maior produção de matéria seca.

A soja plantada na data de 15 de outubro mostrou precocidade na emissão de folhas, apresentando um crescimento acentuado até atingir um IAF com valor 3, por volta dos 55 DAP; após este período, ocorreu um decréscimo na taxa de crescimento e o valor máximo de IAF foi 4,5.

Outro fato observado é que todas as lavouras, plantadas depois do dia 15 de outubro, alcançaram um IAF máximo em torno de 75 DAP, com uma variação máxima de 2 a 3 dias entre as datas. E as lavouras plantadas nas datas de 1º de dezembro e 15 de dezembro alcançaram um IAF máximo com valores próximos, com uma diferença de 0,5 (Figura 8).

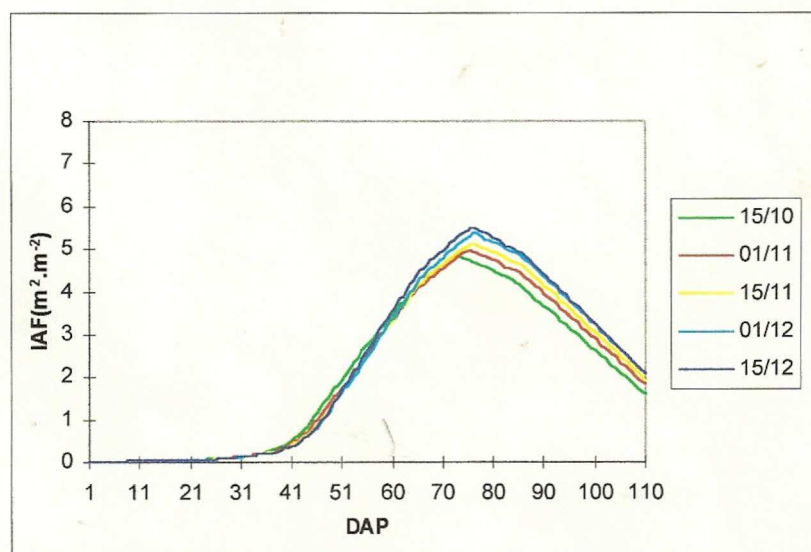


Figura 8 - Valores de índice de área foliar, em $m^2.m^{-2}$, em função de dias transcorridos após o plantio (DAP), para diferentes datas de plantio.

3.4.2.2. Fotossíntese líquida

A maior taxa de fotossíntese líquida foi alcançada pela soja plantada em 15 de dezembro, seguida pela soja plantada nos dias 1º de dezembro e 15 de novembro (Figura 9).

A soja plantada em 15 de outubro também apresentou um crescimento na fotossíntese líquida mais acentuado em relação às demais até, aproximadamente, os 45 DAP (Figura 9). A partir daí, ela apresentou uma redução que está associada à ocorrência de estresse hídrico neste período, o qual perdurou por treze dias, variando de 49 DAP até 62 DAP (Figura 10).

3.4.2.3. Matéria seca dos grãos

No Quadro 7, observa-se que o rendimento da matéria seca de grãos, para a data de 15 de dezembro, apresentou o menor valor. Este fato pode ser atribuído tanto a menor disponibilidade radiativa no mês de dezembro, quanto à disponibilidade hídrica que, apesar de não apresentar déficit hídrico para o plantio nessa data, começou a reduzir nos meses seguintes, os quais coincidem com o período de enchimento de grãos, influenciando assim o rendimento final.

A soja plantada em 15 de outubro apresentou produtividade de grãos maior do que à data citada anteriormente. Entretanto, neste período ainda está havendo aumento da precipitação disponível o que, para a cultura da soja, pode ser considerado um período de reposição de água no solo e, portanto, desaconselhável para o plantio.

No Quadro 7, observa-se ainda que a soja plantada em 1º de novembro apresentou um aumento na produtividade de grãos, quando comparado à data anterior. Este fato é devido às condições hídricas, térmicas e radiativas satisfatórias do mês de novembro, que deve ser aproveitado para o atendimento das exigências do período plantio-emergência. Verifica-se, também, que a data de plantio que apresentou maior produção de grãos foi a de 15 de novembro ($2.700 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$).

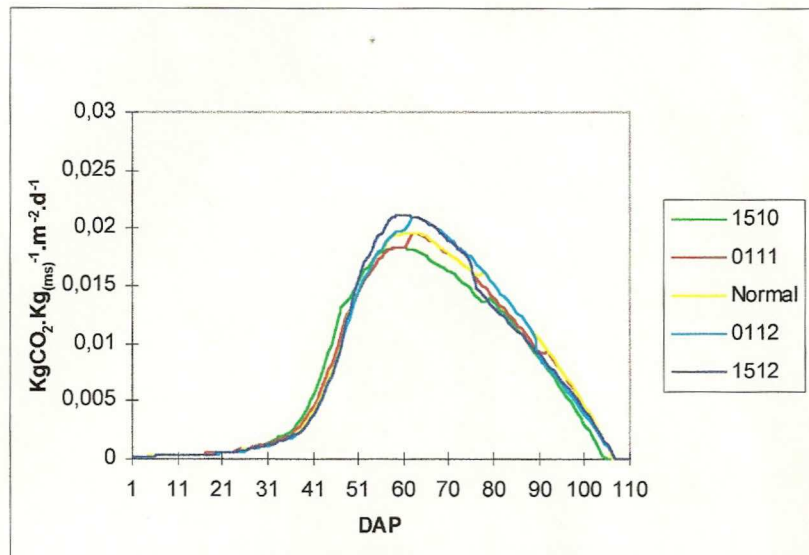


Figura 9 - Valores de fotossíntese líquida, em $\text{kg}(\text{CO}_2) \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, em função de dias transcorridos após o plantio (DAP), para diferentes datas de plantio.

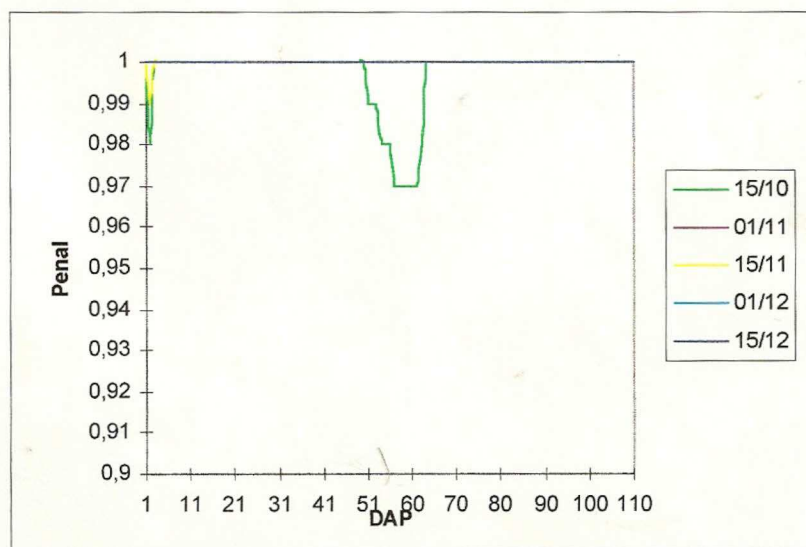


Figura 10 - Valores de penalização da fotossíntese bruta em função de dias transcorridos após o plantio (DAP), para diferentes défices hídricos nas diferentes datas de plantio.

Quadro 7 - Variação da matéria seca final e dos grãos, em $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, e do índice de colheita (IC), em %, em função da variação na data de plantio da cultura da soja

Data do Plantio	15/10	01/11	15/11	01/12	15/12
GRÃOS	2.540	2.650	2.700	2.540	2.480
MS_FINAL	8.100	8.390	8.590	8.590	8.550
IC	31,3	31,5	31,4	29,5	29,0

3.4.3. Conclusões

De acordo com os resultados obtidos pelo modelo, em relação às diferentes datas de plantio, observou-se que a variação conjunta dos elementos climáticos indicam que o melhor período para o plantio da cultura da soja encontra-se na segunda dezena do mês de novembro.

Isto se justifica pelo fato de que, no mês de novembro, a disponibilidade hídrica aumenta ainda mais (Quadro 2). O período que compreende os meses de dezembro a fevereiro, embora apresente uma pequena redução em disponibilidade térmica, em relação ao mês de novembro, é o período que apresenta a maior disponibilidade hídrica ao longo do ano. Logo, os maiores valores de matéria seca, obtidos pelos grãos, ocorreram nas datas de plantio de 15 e 1º de novembro, respectivamente. Efetivamente, em primeiro lugar, a alta disponibilidade hídrica associada à disponibilidade térmica e radiativa satisfatória resulta em alta taxa de crescimento das plantas explicando, assim, a razão pela qual os plantios realizados na segunda quinzena de novembro apresentam um maior rendimento. Em segundo lugar, a alta disponibilidade hídrica nos meses seguintes até março é favorável ao estágio de florescimento e enchimento de grãos para a soja plantada na região de Capinópolis.

Por outro lado, pode-se concluir que as lavouras que alcançam um rendimento máximo são as que têm o período de florescimento e de enchimento de grãos expostos à alta disponibilidade hídrica, que ocorre nos meses seguintes a novembro. Este resultado concorda com aqueles obtidos por CAMARGO (1984), e GARCIA (1979).

4. TESTE E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MODELO

4.1. Teste do modelo

4.1.1. Introdução

Para verificar a precisão do modelo, é necessário testá-lo utilizando os dados observados de modo a permitir uma comparação entre os resultados simulados e observados. Normalmente, o teste é feito comparando-se a produtividade observada em campo com a simulada pelo modelo.

4.1.2. Metodologia

Objetivando comparar os resultados simulados com os observados, foram selecionados dados climáticos recentes, relativos ao período de dois anos, ou seja, 1995/96 e 1996/97. Tais dados serão apresentados e discutidos na seção 4.1.7 (Quadro 10).

4.1.3. Resultados e discussão

Considerando o plantio nas datas de 15 de novembro de 1995 e de 20 de novembro de 1996, o IAF para a primeira estação de plantio alcançou um maior valor em relação à segunda estação (Figura 11).

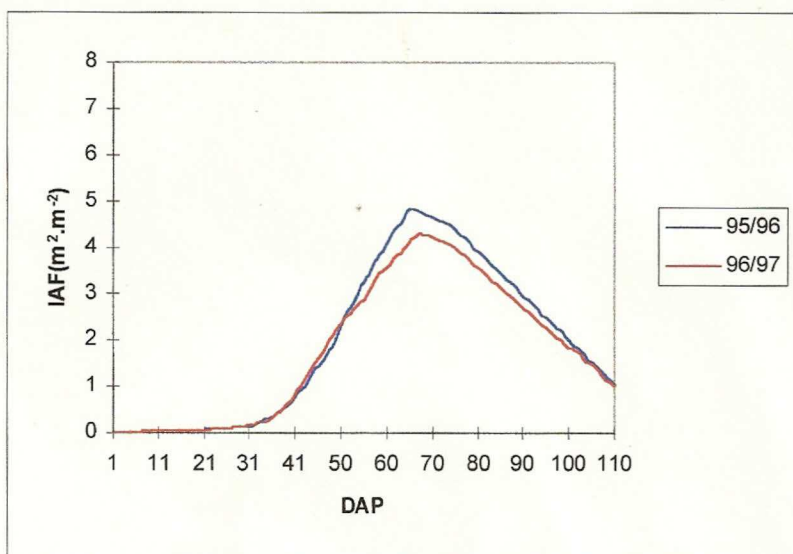


Figura 11 - Valores de índice de área foliar, em $m^2.m^{-2}$, em função de dias transcorridos após o plantio (DAP), para os anos de 1995/96 e 1996/97.

Considerando os resultados apresentados e discutidos nos capítulos anteriores bem como as condições climáticas para os dois períodos, pode-se inferir que tal fato foi devido a menores temperaturas disponíveis, e menores índices de radiação em 1996/97 (Quadro 10).

Foi analisado, também, o déficit hídrico sofrido pela cultura nas diferentes estações de plantio e verificou-se que a soja plantada no período de 1996/97 apresentou um déficit hídrico somente nos primeiros dias sendo que, o déficit foi mais intenso para o período 1995/96 e ao longo de quase toda a fase vegetativa (Figura 12).

Este estresse hídrico mais severo para o período 1995/96, ocorrendo na fase vegetativa entre 1 e 40 DAP, certamente, foi o responsável pela menor taxa de fotossíntese na fase inicial do desenvolvimento da cultura. Isto, possivelmente, é devido ao desvio dos fotoassimilados para outras partes da planta as quais, nessas condições, tornam-se os drenos preferenciais, reduzindo, assim, a capacidade dos órgãos de captura, conseqüentemente ocorrendo menor interceptação da radiação disponível e possivelmente redução na fotossíntese (Figura 13).

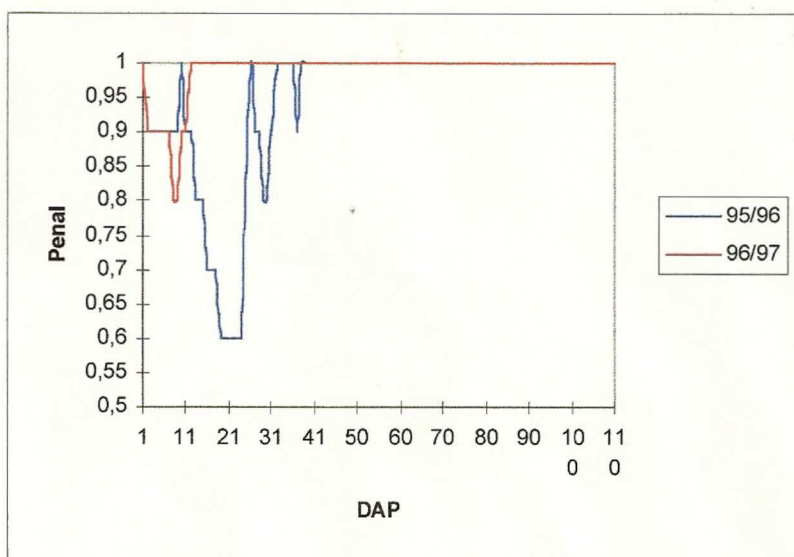


Figura 12 - Valores de penalização da fotossíntese bruta em função de dias transcorridos após o plantio (DAP), para diferentes défices hídricos, para os anos de 1995/96 e 1996/97.

Na Figura 13, verifica-se ainda que a fotossíntese líquida para as lavouras plantadas durante o período 1995/96 apresentou um valor médio de $0,0081 \text{ kg}(\text{CO}_2).\text{m}^{-2}.\text{d}^{-1}$, enquanto para o período 1996/97 ela apresentou um valor médio de $0,0073 \text{ kg}(\text{CO}_2).\text{m}^{-2}.\text{d}^{-1}$. Para o primeiro período, o valor obtido aproximou-se mais dos valores alcançado por meio da radiação provenientes das normais climatológicas da região, ou seja, $0,0079 \text{ kg}(\text{CO}_2).\text{m}^{-2}.\text{d}^{-1}$.

4.1.4. Análise de crescimento e produtividade

A partição da matéria seca para os órgãos da planta, considerando-se as estações de plantio 1995/96 e 1996/97, é ilustrada nas Figuras 14 e 15, as quais apresentam o acúmulo seqüencial de matéria seca nos órgãos. A ocorrência de mudanças do depósito preferencial de um órgão para outro é devida às transformações morfológicas das plantas. As correlações de crescimento entre os diversos órgãos da planta são feitas entre as taxas de crescimento e, conseqüentemente, são governadas tanto pelas condições internas da planta quanto pelas condições do ambiente (BROUWER, 1962).

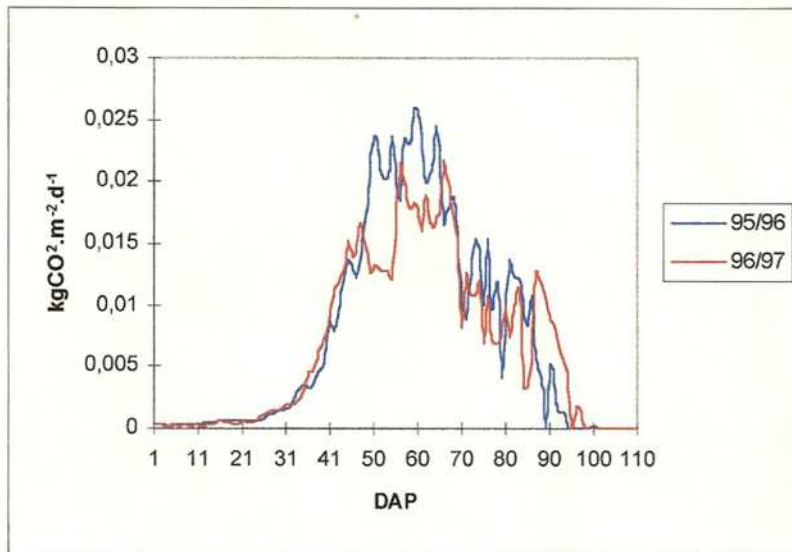


Figura 13 - Valores de fotossíntese líquida, em $\text{kg}(\text{CO}_2).\text{m}^{-2}.\text{d}^{-1}$, em função de dias transcorridos após o plantio (DAP), para os anos de 1995/96 e 1996/97.

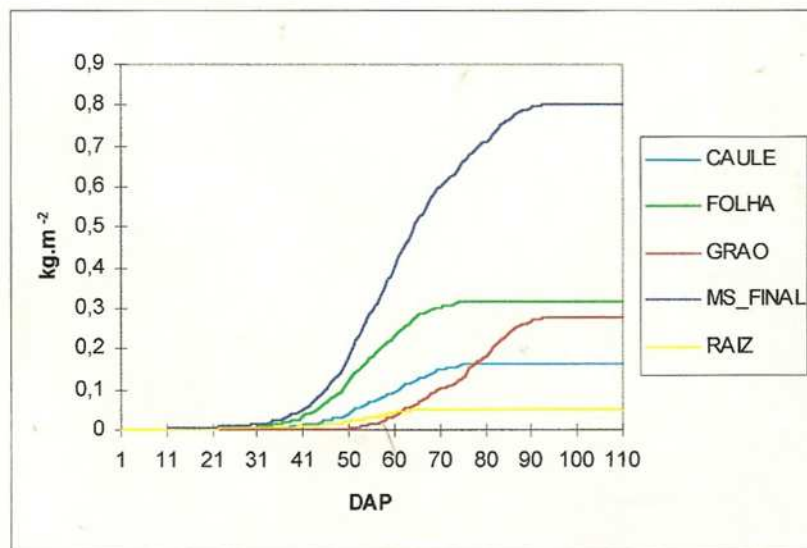


Figura 14 - Partição da matéria seca, em $\text{kg}.\text{m}^{-2}$, em função de dias transcorridos após o plantio (DAP), para os anos 1995/96.

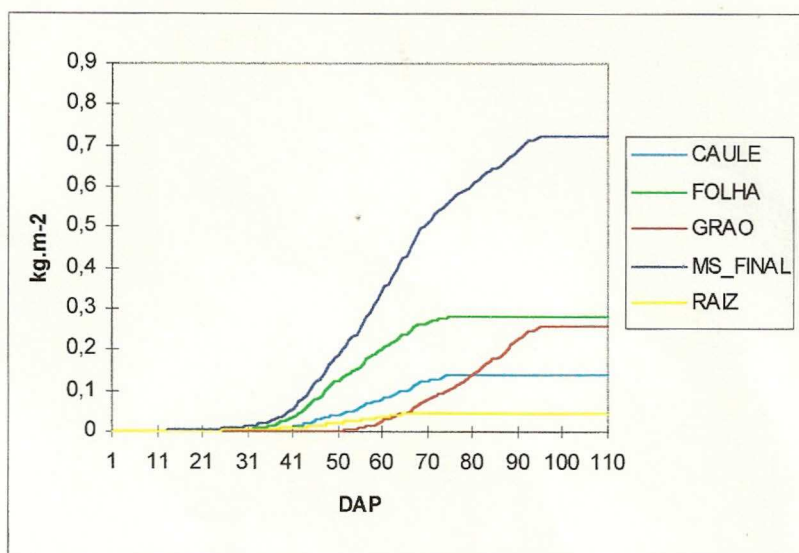


Figura 15 - Partição da matéria seca, em kg.m^{-2} , em função de dias transcorridos após o plantio (DAP), para os anos 1996/97.

Para o período de 1995/96 observa-se que, durante todo o ciclo da cultura, as folhas contribuíram sempre com a maior parte da matéria seca, sendo que a matéria seca total das mesmas alcançou um valor final de $0,316 \text{ kg.m}^{-2}$ (Figura 14).

Para o período de 1996/97, o acúmulo de matéria seca nos órgãos também apresentou a mesma distribuição do ano anterior. Neste período, a matéria seca total das folhas alcançou um valor final em torno de $0,281 \text{ kg.m}^{-2}$ (Figura 15).

Considerando os outros órgãos componentes da planta, pode-se observar a partição de matéria seca nos Quadros 8 e 9.

Quadro 8 - Valores de matéria seca, em kg.ha^{-1} , distribuída para as folhas, caule, raízes e grãos, e de matéria seca total da soja em função de dias transcorridos após o plantio (DAP), para os anos 1995/96

DAP	CAULE	FOLHA	GRAO	RAIZ	MS_FINAL
65	1.221	2.792	630	504	5.147
75	1.602	3.160	1.302	504	6.568
94	1.602	3.160	2.745	504	8.010

Quadro 9 - Valores de matéria seca, em kg.ha⁻¹, distribuída para as folhas, caule, raízes e grãos, e de matéria seca total da soja em função de dias transcorridos após o plantio (DAP) para os anos de 1996/97

DAP	CAULE	FOLHA	GRAO	RAIZ	MS FINAL
67	1.108	2.534	576	458	4.675
76	1.395	2.811	1.081	458	5.745
98	1.395	2.811	2.575	458	7.239

No Quadro 8, observa-se que para os anos de 1995/96, o caule recebeu a segunda maior parte da matéria seca, cresceu até os 75 DAP, quando sua matéria máxima atingida foi 0,160 kg.m⁻². A partição de matéria seca para as raízes, em relação aos outros órgãos, sempre permaneceu menor durante todo o período de crescimento (65 DAP), cessando a partir desse ponto, quando a matéria seca passa a ser distribuída para outros órgão da planta.

Para 1996/97, o caule também apresentou o mesmo comportamento do ano anterior, crescendo até os 76 DAP e atingindo o valor 0,139 kg.m⁻² (Quadro 9).

A análise da produtividade de uma cultura é sempre realizada em função do seu produto mais rentável. Para a soja este produto é o grão, o que o torna a parte mais importante para a cultura.

Para os anos de 1995/96, a contribuição dos grãos na matéria seca total iniciou-se em torno dos 52 DAP; a partir dos 75 DAP, os grãos passaram a constituir o dreno preferencial, acentuado e definitivo, seguindo assim até à maturação (Quadro 8).

Para os anos de 1996/97, a partição para os grãos comportou-se semelhantemente ao ano anterior, sendo que a contribuição iniciou-se aos 51 DAP e, a partir dos 76 DAP, tornou-se o dreno preferencial da planta (Quadro 9).

4.1.5. Data da colheita

O modelo permite, também, identificar o dia mais indicado para a colheita da soja, levando-se em consideração somente o balanço de carbono. Visa-se, com isso, um maior rendimento da cultura.

Utilizaram-se os valores médios (Normais Climatológicas) dos elementos meteorológicos no sentido de melhor visualização gráfica do comportamento da cultura neste aspecto.

Assim configurou-se a Figura 16, na qual observa-se que a produção de carboidratos, a partir de 100 DAP, passa a ser menor do que a respiração de manutenção. Quando permanece no campo após este dia, para se manter viva a soja passa a consumir mais do que produz, ou seja passa a utilizar suas reservas, o que resulta na interrupção do crescimento de toda a cultura, inclusive os grãos. Portanto, para este exemplo, 100 DAP é correspondente ao dia mais indicado para a colheita da soja, com relação à produtividade.

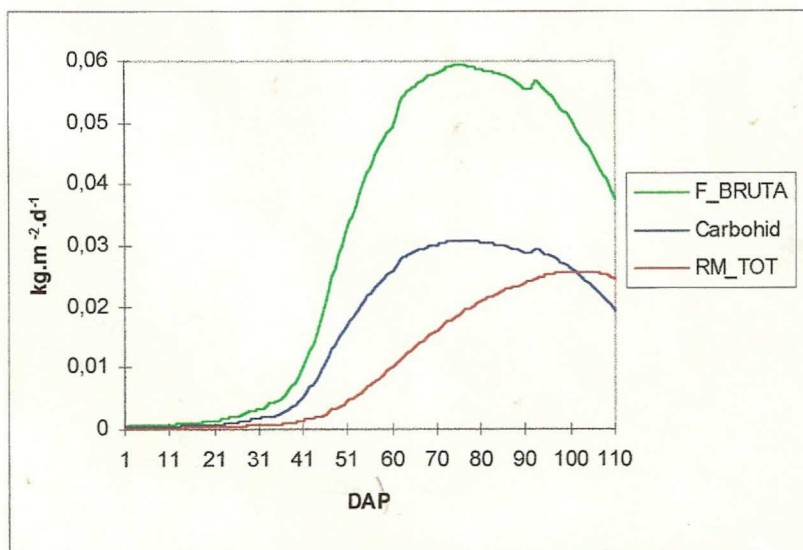


Figura 16 - Valores de respiração de manutenção, em $\text{kg}(\text{CO}_2) \cdot \text{kg}(\text{MS})^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, dos carboidratos, em $\text{kg}(\text{CO}_2) \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, e da fotossíntese bruta, em $\text{kg}(\text{CO}_2) \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, em função de dias transcorridos após o plantio (DAP).

4.1.6. Matéria seca final

O acúmulo de matéria seca total, tanto para os anos 1995/96 como para 1996/97, é representado nas Figuras 14 e 15, que caracterizam o crescimento da planta em três fases que ocorreram sucessivamente, ou seja: a fase inicial, em que se observa um crescimento lento, porém todos os órgãos estavam em crescimento; a fase intermediária entre 42 e 76 DAP, na qual o crescimento foi mais acentuado e, também, onde cessou o crescimento das folhas do caule e das raízes; e uma fase final, na qual os grãos continuavam a desenvolver. A diferença de matéria seca total entre os anos de 1995/96 e 1996/97 foi da ordem de 9,6%.

4.1.7. Produtividade final

O Quadro 10 apresenta os dados médios (Normais Climatológicas) para a região de Capinópolis e os dados climáticos reais observados para os anos de 1995/96 e 1996/97. Também são apresentados os valores da produtividade real da soja e da produtividade simulada pelo modelo SOYCLIMA, para os mesmos anos. Nos dados reais, observa-se a existência de um ano em que a média de temperatura foi maior do que a média do outro. Sendo o modelo sensível a esta diferença em temperatura disponível para a cultura, bem como à radiação solar, observa-se que os dados por ele simulados apresentam diferença na produtividade, em relação aos dados reais.

Quadro 10 - Dados simulados e reais da produtividade de grãos entre os anos de 1995/96 e 1996/97, e precipitação durante o ciclo da cultura para os mesmos

	Médios	Safra 1995/96	Safra 1996/97
TEMPERATURA °C	23,9	26,9	26,5
PRECIPITAÇÃO mm	893	758	936
RADIAÇÃO MJ.m ⁻²	1.868	1.916	1.748
PRODUTIVIDADE kg.ha ⁻¹			
Real		2.400	2.400
Simulada		2.745	2.575

4.1.8. Conclusões

Os resultados obtidos mostram que, considerando as restrições próprias do modelo, ele simulou satisfatoriamente o crescimento da cultura da soja para os anos agrícolas de 1995/96 e 1996/97, evidenciando as diferenças morfológicas e fisiológicas ocorridas nas culturas, sendo que as mesmas são justificadas pelas diferentes condições climáticas nos respectivos anos.

4.2. Análise de sensibilidade com relação a área foliar específica

4.2.1. Introdução

A sensibilidade do modelo aos dados de radiação, temperatura e água disponível foi abordada nos capítulos 3, 4 e 5. Neste tópico, será analisada a sensibilidade do modelo em relação a área foliar.

A escolha deste parâmetro deve-se ao fato que, sendo a folha o órgão de captura da radiação, é de fundamental importância que a sua expansão ocorra da melhor maneira possível, possibilitando uma boa constituição do aparelho fotossintético, o que é fundamental para a planta.

4.2.2. Metodologia

Para a análise de sensibilidade, promoveu-se uma variação de $\pm 5\%$ e $\pm 10\%$ no parâmetro área foliar específica (AFE), o qual foi considerado constante no cálculo do índice de área foliar (Equação 10). As simulações foram realizadas utilizando-se dados reais para os anos de 1995/96 e 1996/97. Também foram utilizados os dados médios (Normais Climatológicas) para a data de plantio de 15 de novembro.

4.2.3. Resultados e discussão

No Quadro 11, observa-se que, em função das variações ocorridas, a produtividade potencial da cultura mostrou-se sempre mais sensível para

valores abaixo do real, sendo que a sensibilidade maior ocorreu para variações de -10% na AFE. Para valores acima do real, a sensibilidade foi menor. A variação ocorrida para os anos de 1995/96 foi bem próxima daquelas ocorridas para os valores normais de 15 de novembro (médias).

Quadro 11 - Variação da matéria seca dos grãos, em $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, em função da variação do valor da área foliar específica

Variação	-10%	-5%	REAL	+5%	+10%
GRÃOS "1995/96"	2.484	2.646	2.747	2.797	2.813
GRÃOS "1996/97"	2.217	2.423	2.577	2.687	2.762
GRÃOS "MÉDIAS"	2.446	2.601	2.700	2.751	2.777

4.2.4. Conclusões

Os resultados anteriores demonstram que o modelo é relativamente sensível às variações da ordem de $\pm 5\%$ e $\pm 10\%$, o que significa que o órgão de captura da planta pode variar influenciando diretamente o rendimento final da cultura.

O importante é ressaltar que o parâmetro AFE e, conseqüentemente, a área foliar devem ser bem estimados. No entanto, a sensibilidade encontrada apresenta níveis razoáveis.

Uma variação de $\pm 10\%$ no parâmetro AFE implicou em uma variação de $\pm 7,4\%$ na produtividade.

RESUMO E CONCLUSÕES

Objetivando verificar o efeito das variações climáticas sobre a produtividade da cultura da soja, em Minas Gerais, desenvolveu-se um modelo de simulação dinâmico, mecanístico e determinístico (SOYCLIMA).

O modelo desenvolvido teve como principal característica a simplicidade dos dados climáticos de entrada. Dessa forma, selecionaram-se os elementos climáticos precipitação, temperatura e insolação (transformada em radiação), por serem de fácil obtenção.

Foram utilizados os dados climáticos para os anos agrícolas de 1995/96 e 1996/97, bem como os dados normais para a região produtora de Capinópolis, MG.

Para separar a influência exercida por cada elemento climático, executou-se o modelo variando a temperatura em $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ e $\pm 1^{\circ}\text{C}$, e variando, também, a precipitação pluvial e a radiação solar em $\pm 20\%$ e $\pm 40\%$. As variações foram feitas para cada elemento climático, enquanto os outros eram mantidos constantes. Os dados utilizados nesta análise foram obtidos a partir das Normais Climatológicas para a região em estudo.

A fim de conhecer, conjuntamente, a influência dos elementos climáticos, variaram-se as datas de plantio ao longo de três meses, com intervalos de 15 dias, utilizando os dados das Normais Climatológicas para a região em estudo.

A variação da disponibilidade térmica, solar e hídrica, durante o ciclo da cultura, influencia de modo a alterar diferencialmente os mecanismos de captura e utilização da radiação.

Na tentativa de explicar a variação da produtividade da cultura da soja, dentre todos os elementos climáticos, o que mais se destacou foi a radiação, o que ocorreu devido o mesmo ser o mais importante para a planta e também pelo fato de que o modelo SOYCLIMA apresenta maior sensibilidade à variação deste elemento.

Os resultados mostraram, também, que o rendimento de grãos, matéria seca final, índice de área foliar e fotossíntese são satisfatoriamente estimados pelo modelo SOYCLIMA.

A eficiência do modelo na determinação das variações morfológicas e fisiológicas da cultura, em resposta às variações climáticas, evidenciam o seu alto potencial de aplicação para o manejo da cultura.

O modelo apresentou 87,5% de ajustamento em relação à produtividade, para os anos de 1995/96, e 93,2% para os anos de 1996/97.

Nestes resultados, é necessário considerar que as diferenças ocorridas entre os valores reais e aqueles simulados são devidas à não consideração, por parte do modelo, de outros tipos de restrição senão a hídrica, bem como aos erros amostrais envolvidos na medida de produtividade real.

RECOMENDAÇÕES

O modelo SOYCLIMA mostrou-se eficiente para previsão de produtividade da cultura da soja, desde que consideradas suas restrições. Todavia, o modelo simula a produtividade considerando apenas as restrições hídricas, utilizando equações de natureza bastante simples e não considerando a verdadeira complexidade envolvida no sistema água-solo-planta.

Dessa forma, sugere-se que pesquisas futuras incluam o mecanismo do balanço de água de modo mais completo, abrangendo toda a complexidade do sistema.

O SOYCLIMA utilizou, também, parâmetros de diferentes variedades de soja, cultivadas em diferentes países. Entende-se, portanto, que para se obter um modelo com maior consistência nos resultados e que ofereça menor probabilidade de subestimativa ou superestimativa, é necessária que pesquisas futuras sejam realizadas por meio de experimentos no campo, no sentido da obtenção de parâmetros específicos para uma determinada variedade e região. Isto possibilitará evitar a ocorrência de possíveis erros nos valores dos parâmetros que compõem as equações e que representam os mecanismos fisiológicos e morfológicos da planta.

Recomenda-se a utilização do modelo no meio científico, de forma a explorar seu potencial em relação à análise do sistema como, por exemplo, a

captura e utilização da radiação, assim como a interação de seus mecanismos no todo.

Deve-se, também, destacar a importância da capacidade do modelo no sentido de permitir o entendimento das causas das variações na produtividade, em função das variações climáticas.

Portanto, o modelo de simulação SOYCLIMA revela grande potencial ao evidenciar os benefícios do manejo das culturas, orientando o agricultor sobre a adoção de métodos mais eficientes de produção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMS, R.M., ROSENZWIG, C., PEART, R.M. et al. Global climate change and US agriculture. **Nature**, v. 345, p. 219-24,1990.
- ADDISCOTT, T.M., WAGNET, R.J. Concepts of solute leaching in soils: a review of modelling approach. **J. Soil Sci.**, v. 36,p.411-24,1985.
- AGGARWAL, P.K., KALRA, N. Analyzing the limitations set by climatic factors, genotype, and water and nitrogen availability on productivity of wheat II. Climatically potential yields and management strategies. **Field Crops Research**, v.38, p. 93-103,1994.
- AGGARWAL, P.K., SINHA, S.K. Effect of probable increase in carbono dioxide and temperature on productivity of wheatin India. **Journal Agriculture Meteorology**., v.48, p.811-14,1993.
- AGGARWAL, P.K., Wheat production in south-east Asia-Potential and constraints. **Outlook Agric.**, v.17, p.49-53,1988.
- ALLEN, L.H., YOCUM, C.S., LEMON, E.R. Photosynthesis under field conditions. VII. Radiant Energy Exchanges within a corn crop canopy and implications in water use efficiency. **Agron. J.**, v.56, p. 253-9, 1964.

ANGUS, J.F., STAPPER, M., DONNELLY, J.R. Simulation models for strategic and tactical management of crops and pastures. **J. Agric. Meteorol.**, v.48, p.775-8, 1993.

ANUÁRIO ESTATÍSTICO DO BRASIL. Rio de Janeiro: v. 46, 1985.

ARANTES, N.E. Estudo da época de plantio e da adaptabilidade da cultura da soja em Rio Paranaíba e Minas Gerais, MG. In : EMPRESA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA DE MINAS GERAIS. **Projeto soja**; relatório 76/77. Belo Horizonte: 1978.p. 73-6.

ARNOLD, C. Y. Predicting stages of sweet corn (*Zea mays*(L.) development. **J. Am. Soc. Hort. Sci.**, v.99, n.6, p. 501-5, 1974.

ARRUDA, F.B., MASCARENHAS, H.A.A., VIEIRA, S.R. et al. **Efeito térmico na produção de soja**: análise. Campinas: Instituto Agronômico, 1977. 11p. (Boletim técnico, 40).

AZAM-ALI, S.N., CROUT, N.M.J., BRADLEY, R.G. Perspectives in modelling resource capture by crops. In: MONTEITH, J.L., SCOTT, B.K., UNSWORTH, M.H. **Resource capture by crops**. Nottingham: Nottingham University, 1994. p.125-148.

BAIER, W., ROBERTSON, G.W. The performance of soil moisture estimates as compared with the direct use of climatological data for estimating crop yields. **Agric. Meteorol.**, v.5, p.17-31, 1968.

BARNI, N. A., COSTA, J. A. Efeitos de períodos de inundação do solo sobre o rendimento de grãos de soja (*Glycine max. L. Merrill*). **Agron. Sulriogr.**, v.11, n.2, p.207-22, 1975.

BERLATO, M.A., GONÇALVES, H. Relação entre o índice hídrico P/ETP e o rendimento da soja (*Glicine max. (L.) Merrill*). **Agron. Sulriogr.**, v.14, n.2, p.227-33, 1978.

BERLATO, M.A. Bioclimatologia da soja. In: MIYASAKA, S., MEDINA, J.C. (Eds.). **A soja no Brasil**. Campinas: ITAL, 1981. p. 175-84.

- BERLATO, M.A., BERGAMASCHI, H. Consumo de água da soja. I. Evaporação estacional em ótimas condições de disponibilidade de água no solo. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PESQUISA DE SOJA, 1, 1978, Londrina. **Anais...** Londrina: EMBRAPA / CNPSo, 1978. V. 1, p.53-8.
- BOWES, C., OGREN, W.L., HAGEMAN, R.H. Light saturation, photosynthesis rate, RuDP carboxylase activity and specific leaf weight in soybeans grown under different light intensities. **Crop Sci.**, v.12, p.77-9, 1972.
- BRITTON, C.M., DODD, J.D. Relationships of photosynthetically active radiation and shortwave irradiance. **Agric. Meteorol.**, v.17, p.1-7, 1976.
- BROTHWICK, H.A., PARKER, M.W. Influence of photoperiods upon the differentiation of meristem and the blossoming of Biloxi soybeans. **Bot. Gaz.**, v.99, p. 825-39, 1938.
- BROUWER, R. Distribution of dry matter in the plant. **Neth. J. Agric. Sci.**, v.10, p.361-75, 1962.
- BROWN, D. M. Soybean ecology. I. Development temperature relationships from controlled environment studies. **Agron. J.**, v.52, n.9, p.493-5, 1960.
- BROWN, D. M., CHAPMAN, L.J. Soybean ecology. II. Development-temperature moisture relationships from field studies. **Agron. J.**, v.52, n.9, p. 496-9, 1960.
- BROWN, D.M., CHAPMAN, L.J. Soybean ecology II. Development-temperature-moisture relationships from field studies. **Agron. J.** v.2, p.496-9, 1960.
- BRUN, W.A., COOPER, R.L. Effects of light intensity and carbon dioxide concentration on photosynthetic rate of soybean. **Crop Sci.** v.7, p.451-4, 1967.
- BRUNINI, O. MIRANDA, M.A.C., MASCARENHAS, H.A.A. et al. Teste de um modelo agroclimático que relacione o regime pluviométrico com as variações da produtividade agrícola. In: SEGOVIA, R.M. **Determinação do efeito da precipitação pluviométrica na produtividade agrícola.** Brasília: CFP, 1982 p.21-46. (Coleção Análise e Pesquisa, 24).

- BURNSIDE, C.A., BOHNING, R.H. The effect of prolonged shading on the light saturation curves of apparent photosynthesis in sun plants. **Plants Physiol.**, v. 32, p.61-3, 1957.
- CALDWELL, B. E. (Ed.). **Soybeans**: improvement, production, and uses. Madison, EUA: American Society of Agronomy, 1973. 681 p.
- CÂMARA, G.M.S. **Efeito do fotoperíodo e da temperatura no crescimento, florescimento e maturação de cultivares de soja (*Glycine max* (L.) Merrill)**. Viçosa, M.G: UFV, 1991. 266 p. Tese (Doutorado em Fititecnia) - Universidade Federal de Viçosa, 1991.
- CAMARGO, A.P., CHIARINI, J.V., DONZELI, P.L. et al. **Zonamento da aptidão ecológica para a cultura da soja, girassol e amendoim no Estado de São Paulo**. São Paulo: INSTIOLEOS, 1971. 35p.
- CAMARGO, M.B.P. **Exigências bioclimáticas e estimativa da produtividade para quatro cultivares de soja no Estado de São Paulo**. Piracicaba, SP: USP., 1984. 96p. Dissertação (Mestrado em Agrometeorologia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - USP, 1984.
- CHANG, J. **Climate and agriculture - an ecological survey**. 2.ed. Hilo: University of Hawaii, 1971. 304p.
- COOPER, C.S. Response of birdsfoot trefoil and alfafa to various levels of shade. **Crop Sci.**, v.6, p.63-6, 1966.
- COSTA, L.C. **Modelo agrometeorológico de previsão de produtividade da soja para as regiões do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, Minas Gerais**. Viçosa, MG: UFV, 1988. 40p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, 1988.
- COSTA, M.T.P.M. Aspectos econômicos da cultura da soja. **Informe Agropecuário**, v.8, p.3-8, 1982.
- CROOKSTON, R.K., TREHARNE, K.J., LUDFORD, P. et al. Response of beans to shading. **Crop Sci.**, v.15, p.412-6, 1975.

- CURRY, R. B., BAKER, C. H., STREER, J.G. SOYMOD I: A dynamic simulator of soybean growth and development. **Transaction of the ASAE**, v.18, n.5, p.963-8, 1975.
- CURRY, R. B., CHEN, L.H. Dynamic simulation of plant growth. Part II. Incorporation of actual daily weather and partitioning of net photosynthate. **Transactions of the ASAE**, v.14, n.6, p.1170-4, 1971.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE METEOROLOGIA -DNMET. **Normais climatológicas (1961-1990)**. Brasília, 1992. 85p.
- DOORENBOS, Y., KASSAM, A. H. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979. 179p. (FAO-Irrigation and Drainage Paper, 33).
- DOORENBOS, Y., KASSAM, A. H., 1986. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1986. (FAO-Irrigation and Drainage Paper, 33).
- DOSS, B.D., R.W. PEARSON, ROGERES, H.T. Effects of soil water stress vs. various growth stages on soybean yield. **Agron. J.**, v.66, n.3, p.297-9, 1974.
- EMERSON, B.N., MINOR, H.C. Response of soybeans to high temperature during germination. **Crop Sci.**, v.19, p.553-6, 1979.
- ESPINOSA, W. Resposta de doze cultivares de soja ao déficit hídrico em Latossolo Vermelho -escuro de cerrados do Distrito Federal. I - Rendimentos, área foliar e desenvolvimento radicular. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.17, p. 447-58, 1982^a.
- FEHR, W. R., CAVINESS, C.E. **Stages of soybean development**. Ames, Iowa: Iowa State University, 1977. 11 p. (Special Report, 80)
- FISCHER, R. A. Wheat. In: **Potential productivity of field crops under different environments**. Manila, Philippines: International Rice Research Institute, 1983., p. 129-154.
- FRANCE, J., THORNLEY, J.H.M. **Mathematical Models in Agriculture**. The Quantitative Approach to problems in Agriculture and Related Sciences. London: Butterworth, 1984.

- GAASTRA, P. Photosynthesis of crop plant as influenced by light, carbon dioxide, temperature and stomatal diffusion resistance. **Mededel. Landbouwhogeschool**, v.59, p.1-68, 1959.
- GANDOLFI, V. H., MULLER, L. Fotoperiodismo. In: MIYASAKA, S., MEDINA, J.C.(Eds.). *A soja no Brasil*. Campinas: ITAL, 1981. p.129-42.
- GARBE, D. F., METZER, R. B. Temperature-induced inhibition of soybean hypocotyl elongation and seedling emergence. **Crop Sci.**, v.9, p.331-3, 1969.
- GARCIA, A. **Estudo do índice de colheita e de outras características agrônômicas de dez cultivares de soja, *Glycine max (L.) Merrill*, e de suas correlações com a produção de grãos em duas épocas de semeadura**. Viçosa, MG: UFV, 1979. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Viçosa, 1979.
- GARDNER, W.W., ALLARD, H.A. Photoperiodic responses of soybeans in relation to temperature and other environmental factors. **J. Agric. Res. Punjab**, v.41, n.10, p.719-35, 1930.
- GAY, L.W. The regression of net radiation upon solar radiation. **Arch. Meteorol. Geoph. Biokl. Ser. B**. V.19, p.1-14, 1971.
- GAZZONI, D. L. Botany. In : **Tropical soybean** : improvement e production.. Rome: FAO, 1994. P.1-12. (FAO-Plant Production and Protection Series, 27).
- GREEN, G. C., KUHNE, F.A. Grow of the banana plant in relation to winter air temperature fluctuation. **Agroplanta**, v.1, p.157-62, 1969.
- GRISSON, P., RANEY, W.A., HOGG, P. **Crop response to irrigation in the Yazoo-Mississippi Delta**. Mississippi: Miss. Agric. Exp. Sta., 1955. 21p. (Bulletin, 531)
- GUIMARÃES, J.A.P., ARANTES, N.E., REZENDE, A.M. Estudo das interações época de plantio, espaçamento e cultivares de soja durante dois anos em Uberaba, MG. In: EMPRESA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA DE MINAS GERAIS. **Projeto soja**; relatório 75/76. Belo Horizonte: 1978 a. p. 97-113.

- GUIMARÃES, J.A.P., ARANTES, N.E., RIOS, G.P. Estudo do efeito de seis épocas de plantios em duas cultivares de soja e em três espaçamentos, no município de Uberaba, MG. In: EMPRESA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA DE MINAS GERAIS. **Projeto soja**; relatório 75/76. Belo Horizonte: 1978 b. p. 86-96.
- GUTIERREZ, A.P., MARIOT, E.J., CURE, J.R. **A model of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) growth types I-III: factor affecting yield. Bean and growth development**. S.I.: Elsevier Science, 1993. P.37-63.
- HAMMER, K. C. Interrelation of light and darkness in photoperiodic induction. **Bot. Gaz.**, v.101, n.3, p.658-87, 1940.
- HARGREAVES, G.H. Defining using refernce evapotranspiration. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**. v.120, n.6, p.1132-9, Nov./ Dec. 1994.
- HARTWING, E.E. Varietal development. In: CALDWELL, B.E. (Ed.) **Soybeans: improvmnt, production, and uses**. Madison, EUA: American Society of Agronomy, 1973. p. 187-210.
- HODGES, T., FRENCH, V. Soyphen: soybean growth stages modelled from temperature, day length and water availability. **Agron. J.**, v.77, p.500-5, 1985.
- JENSEN, M.E. (Ed.) **Consumptive use of water and irration water requeriments**. New York: American Society of leival Engineers, 1973.
- JIANG, H., EGLI, D.B. Soybean seed number and crop growth rate during flowering. **Agron. J.**, v.87, n.2, p.264-7, 1995.
- JOHNSON, I.R., THORNLEY, J.H.M. Vegetative and crop growth model incorporating leaf area expansion and senescence, and applied to grass. **Plant Cell Environm.**, v.6, p.721-9, 1983.
- JONES, J.W., RITCHIE, J.T. **Crop growth models**. In: HOFFMAN, G.J., HOWELL, T.A., SOLMON, K.H. **Management of farm irrigation systems**. Michigan, ASAE, 1990. p.63-89.

- KAC, M. Some mathematical models in science. **Science**, v.166, p.695-9, 1969.
- KVET, J., ONDOCK, J.P., NECAS, J. et al. Methods of growth analysis. In: JUNK, N.V. (Ed.). **Plant growth and development**. New York: McGraw-Hill, 1971. p.343-91.
- LAWN, J.R., BYTH, D.E. Response of soybeans to planting date in southeastern Queensland. I. Influence of photoperiod and temperature on phasic development patterns. **Aust. J. of Agric. Res.**, v.24, n.1, p.67-80, 1973.
- LIMA, M.G., **Calibração e validação do modelo cerez-maize em condições tropicais do Brasil**. Piracicaba, SP: USP, 1995. 117p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – USP, 1995.
- LIU, W.T.H., LIU, B.W.Y. Modelo de previsão de produtividade de soja no Estado de Minas Gerais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 4, 1986, Brasília, CONGRESSO INTERAMERICANO DE METEOROLOGIA, 1, 1986, Brasília: **Anais...** Belo Horizonte: SBMET, 1986. p.48-59.
- MAJOR, D.J., JOHNSON, D.R., LUEDDERS, V.D. Evaluation of eleven thermal unit methods for predicting soybean development. **Crop Sci.**, v.15, p.172-4, 1975.
- MARCOS FILHO, J., GODOY, O. P., CÂMARA, G.M.S. Tecnologia da produção. In: CÂMARA, G.M.S., GODOY, O. P., MARCOS FILHO, J. et al. **Soja: produção, pré-processamento e transformação agroindustrial**. São Paulo: Secretaria da Indústria, Comércio, Ciência e Tecnologia, 1982. p.1-39. (Extensão Agroindustrial, 7).
- MASCARENHAS, H.A.A., MIYASKA, S. **Instruções para a cultura da soja**. Campinas: Serviço de Comunicação Rural, 1968. 49p. (Boletim técnico SCR, 22).
- McCREE, K.J. An equation for the rate of respiration of white clover plants growing under controlled conditions. In: SETLIK, I. (Ed.). **Prediction and measurement of photosynthetic productivity**. Wageningen: Pudoc, 1970. p. 221-9.

- MEYER, W.S., RITCHIE J.T. Resistance to water flow in the sorghum plant. **Pl. Physiol.**, v.65, p. 33, 1980.
- MEDERSKI, H.I., JEFFERS, D.L., PERES, D. R. Water and relations. In: CALDWELL, B.E. **Soybeans**: improvement, production, and uses. Madison: EUA: American Society of Agronomy, 1973. p. 289-96.
- MONSI, M., SAEKI, T. Über der lichtfaktor in den pflanzengesellschaften und seine bedeutung für die stoffproduktion. **Jap. J. Bot.**, v.14, p.22-52, 1953.
- MONTEITH, J.L. Climatic variation and the growth of crops. **Quart. J. Royal Meteorol. Soc.**, v.107, p.749-74, 1981.
- MONTEITH, J.L., UNSWORTH, M.H. **Principles of environmental physics**. 2.ed. London: Edward Arnold, 1990. 291p.
- MONTEITH, J.L. Light and crop production. **Field Crop Abstracts**. v.18, n.4, p. 213-9, 1965.
- MONTEITH, J.L., SZEICH, G. The relation balance of bare soil and vegetation. **Quart. J. of the Royal Meteorol. Soc.** v.87, p.159-69, 1961.
- MORAES, V.H.F. **Bases fisiológicas da produtividade das culturas**. Belém: EAA, 1971. p. 15-32. (Boletim Técnico, 4).
- MOTA, F. S. **Soya bean and weather**. Genova: Switzerland: World Meteorological Organization, 1978 (Technical Note, 160). 65p.
- MOTA, F.S, ZAHLER, P.J.M. **Clima, agricultura e pecuária no Rio Grande do Sul**. Pelotas: Mundial, 1994. 166p.
- MOTA, F.S. Condições climáticas e produção de soja no sul do Brasil. In: VERNETTI, F.J. **Soja**: planta, clima, pragas, moléstias e invasoras. Campinas: Fundação Cargill, v.1, p.93-126, 1983.

- MOTA, F.S., GARCEZ, J.R.B., BONATO, E.R. et al. **Época de semeadura da soja no Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. S.I.: IPEAS, 1973. 5p. (Mimeografado).
- MOTA, F.S., ZAHLER, P.J.M. **Clima, agricultura e pecuária no Rio Grande do Sul**: 40 anos de pesquisa agroclimatológicas em Pelotas. Pelotas: Mundial, 1994. 166p.
- PASCALE, A.J., VILLEGAS, J.A., MEDINA, L.F. Aptitud agroclimática del Noroeste Argentino par el cultivo de la soja. **Rev. Agron. Noroeste Argentino**, v.10, n.3/4, p.173-203, 1973.
- PENDLETON, J.W., HARTWING, E.E. Managment. In: CALDWELL, B.E. (Ed.). **Soybeans**: improvement, production and uses. Madison: American Society of Agronomy, 1973. p.211-37.
- PENNING DE VRIES, F.T.W., VAN LAAR, H.H. **Simulation of plant growth and crop production**. Pudoc, 1982. 308p. (Simulation Monographs).
- PENNING DE VRIES, F.W.T., JANSEN, D.M., TEN BERGE, H.F.M. et al. **Simulation of ecophysiological process of growth in several annual crops**. Wageningen: Pudoc: 1989. 271p.
- PENNING DE VRIES, F.W.T., SPITTERS, C.J.T. The potential for improvement in crop yield simulation. In: Muchow, R.C., BELLAMY, J.A. (Eds.). **Climatic risk in crop production models & management for the semiarid tropics & subtropics**. Wallingford: CAB International, 1991 p.123-40.
- POTTER K. N., WILLIAMS, J.R. Predicting daily mean soil temperatures in the EPIC simulation model. **Agron. J.** v.86, n.6, p.1006-11,1994.
- PROGRAMA NACIONAL DE IRRIGAÇÃO - PRONI. **Tempo de irrigar**: manual do irrigante. São Paulo: Mater, 1987.
- REMUR, R.A.F. Observations du thermometre, faites à Paris pendat l'année 1735. Mén: Acad Aci, Paris Apud: Robertson, G.W. A biometeorological time for a cereal crop involving day and night temperatures and phtoperiod. **J. Biometeorol.** v.12, n.3, p.191-223, 1968.

- RICHARDS, F.J. The quantitative analysis of growth. In: STEWARD, F.C. (Ed.). **Plant physiology: a treatise**. New York: Pergamon, 1970. 303p.
- ROBERTSON, G.W. A biometeorological time scale for a cereal crop involving day and night temperature e photoperiod. **Int. J. Biometeorol.**, v.12, p.191-223, 1968.
- RUNGE, E.C.A., ODELL, R.T. The relation between precipitation, temperature an yield for soybeans in the Agronomy South Farm, Urbana, Illinois, **Agron. J.** v.52, n.5, p.245-7, 1960.
- SAKAMOTO, C.M., SHAW, R.H. 1967. Light distribution in field soybean canopies. **Agron. J.**, v.59, p.7-9, 1967.
- SALINAS, A. R., SANTOS, D. S. B., SANTOS FILHO, B.G., et al. Comportamiento de genotipos de soja, hasta el estado de plántulas, en diferentes niveles de humedad. In: CONFERENCIA MUNDIAL DE INVESTIGACIÓN EN SOJA, 4, 1989, Buenos Aires, Argentina. **Actas...** Buenos Aires, Argentina: Asociación Argentina de la Soja, 1989. p.376-82.
- SCHOV, J.B., JEFFERS, D.L., STREETER, J.C. Effects of reflectors, black boards, or shades applied at different stages of plant development on yield of soybeans. **Crop Sci.**, v.18, p.29-34, 1978.
- SCOTT, W.O., ALDRICH, S.R. **Modern soybean production**. Cincinnati, Ohio: Farm Quarterly, 1970. 129p.
- SEDIYAMA, T., PEREIRA, M.G., SEDIYAMA, C.S. et al. **Cultura da soja**. Parte I. Viçosa, MG.: UFV. 1993. 96p. (Boletim, 211).
- SEGOVIA, R.M., ANDRADE, E.G. Um modelo de determinação do efeito da precipitação pluviométrica na produtividade agrícola. In: ___. **Determinação do efeito da precipitação pluviométrica na produtividade agrícola**. Brasília: CFP, 1982. p.11-18. (Coleção Análise e Pesquisa, 24).
- SHAW, R., LAING, D.R. Moisture stress and plant response. In: PIERRE, W.H. (Ed.). **Plant environment and efficient water use**. Madison: Am. Soc. Agron., 1965. p.73-94.

- SHIBLES, R.M, WEBER, C.R. Effect of canopy arrangements on light interception and yield of soybeans. **Agron. J.** v.59, p.155-9, 1967.
- SHIBLES, R.M., WEBER, C.R. Interception of solar radiation and dry matter production by various soybean planting patterns. **Crop Sci.**, v.6, p.55-9, 1966.
- SINCLAIR, T.R., SALADO-NAVARRO, L., MORANDI, E.N. et al. Soybean yield in Argentina in response to weather variation among cropping seasons. **Field Crops Res.**, v.30, p.1-11, 1992.
- SINGH, B.P. Effect of shade growth of spring barley. **Phyton**, v.36, p.53-60, 1978.
- SINGH, M., OGREN, W.L., WIDHOLIM, J.M. Photosynthetic characteristics of several C₃ and C₄ plant species grown under different light intensities. **Crop Sci.** v.14, p.563-6, 1974.
- SIONIT, N., KRAMER, P.J. Effect of water stress during different stages of growth of soybean. **Agron. Journ.**, v.69, n.2, p.274-8, 1977.
- SMITH, J.W. The effect of weather upon the yield of corn. **Monthy Weather Review**, v.42, p.78-87, 1914.
- SPOONER, A.E. **Effect of irrigation timing and length of flooding periods on soybean yields.** Fayetteville, Arkansas: Agric. Exp. Station, 1961. 27p. (Bulletin, 644).
- TAKAHASHI, C., ARANTES, N. E., GUIMARÃES, J.A.P. Estudo de diferentes épocas de plantio da cultivar de soja Paraná em Rio Paranaíba, MG. In: EMPRESA DE PESQUISAS AGROPECUÁRIAS DE MINAS GERAIS, **Projeto soja; RELATÓRIO 75/76.** BELO HORIZONTE: 1978. p.82-5.
- THOMPSON, L.M. Weather and tecnologia in the production of soybeans in the central United States. **Agron. J.**, v.62, n.2, p.232-6, 1970.

- THORNLEY, J.H.M. **Mathematical models in plant physiology: a quantitative approach to problems in plant crop physiology.** London: Academic, 1976. 318p.
- THORNLEY, J.H.M., JOHNSON, I.R. **Plant and crop modelling.** Oxford: Oxford University, 1990. 669p.
- TORRES, E. **Efeito da época de sementeira, espaçamento entre fileiras e população de plantas sobre o rendimento de grãos e outras características agrônômicas da soja *Glycine max (L.) Merrill*, em Londrina-PR.** Viçosa, MG: UFV, 1981. 107p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Viçosa, 1981.
- TRANG, K.M., GIDDENS, J. Shading and temperature as environmental factors affecting growth, nodulation, and symbiotic N₂ fixation soybeans. **Agron. J.**, v.72, p.305-8, 1980.
- VALIO, I.F.M. Reprodução em plantas superiores. In: FERRI, M.G. (Coord.). **Fisiologia vegetal.** São Paulo: EPU, EDUSP, 1979. v.2, p.281-312.
- VIANELLO, R.L., ALVES, A.R. **Meteorologia básica e aplicações.** Viçosa, MG. UFV, 1991. 499 p.
- VISSER, C.L.M. Alcepas, an onion growth model based on Sucros 87. I. Development of the model. **J. of Hort. Sci.**, v.69, n.3, p.501-18; 1994.
- WAHUA, T.A.T., MILLER, D.A. Effects of shading on the N₂ - fixation, yield, and plant composition of field-growth soybeans. **Agron. J.** v.70, p.387-92, 1978.
- WATSON, D.J. The physiological basis of variation in yield. **Adv. Agron.**, v. 4, p.101-45, 1952.
- WENDT, W. **Estudos de radiação solar sobre soja [*Glycine max (L.) Merrill*] cultivares industrial e hardee.** Piracicaba, S.P.: ESALQ, 1978. 66p. Dissertação (Mestrado em Agrometeorologia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1978.

- WHIGHAM, D. K., MINOR, H. C. Agronomic characteristics and environmental stress. In: NORMAN, A.G. (Ed.). **Soybean, physiology, agronomy, and utilization**. [S. I.] Academic, 1978. p.77-118.
- WHISLER, F.D., ACOCK, B., BAKER, D.N., Crop simulation models in agronomic systems. **Advances in Agronomy**, v.40, p.141-208, 1986.
- WILKERSON, G.G., JONES, J.W., BOOTE, K.J. et al. Modeling soybean growth for crop management. **Transactions of the ASAE**, v.26, n.1, p.63-73. 1983.
- WILLIAMS, G.D.V. Estimates of prairie provincial wheat yields based on precipitation and potential evapotranspiration. **Can. J. Plant Sci.**, v.53, p.17-30, 1973.
- WILLIAMS, G.D.V. Weather and prairie wheat production. **Can. J. Agric. Econ.**, v.17, n.1, p.99-109, 1969.
- WILLIAMS, G.D.V., ROBERTSON, G.W. Estimating most probable prairie wheat production from precipitation data. **Can. J. Plant Sci.**, v.45, p.34-47, 1965.
- WITT, C.T. Simulation of living systems. In: PENNING DE VRIES, F.W.T., VAN LAAR, H.H. (Eds.). **Simulation of plant grow and crop production**. Wageningen: Pudoc, 1982. p. 3-8.
- YAO, A.Y., SHAW, R.H. Effect plant population and planting pattern of corn on the distribution of net radiation. **Agron. J.** v.56, p.165-9, 1964.
- YAO, A.Y.M. The R index for plant water requirements. **Agric. Meteorol.**, v.6, n.4, p.259-73, 1969.

APÉNDICES

APÊNDICE A

Quadro 1A - Parâmetros utilizados pelo modelo SOYCLIMA

Parâmetro	Valor	Descrição e Unidade
kdif	0,7	COEF EXTINGÇÃO (ADIMENSIONAL)
EG	0,76	EFICIÊNCIA DE CRESCIMENTO %
fm30	0,052	FOT MAXIMA $\text{kgCO}_2.\text{ha}^{-1}.\text{d}^{-1}$
tb	10,0	TEMP BASE ($^{\circ}\text{C}$)
rm30	0,06	R MANUT. A 30°C ($\text{kgCO}_2.\text{KG}^{-1}.\text{s}^{-1}$)
q10	2,0	Q_{10}
m	0,1	COEFICIENTE DE TRANSMISSIVIDADE
phi	3,1416	LETRA GREGA
CC	100,0	CAPACIDADE DE CAMPO mm
JDAY	250,0	DIA JULIANO DO PLANTIO
P	0,01721	DO DIA JULIANO cte.
LAT	-18,7	LATITUDE EM GRAUS
E_FO	0,0132	EFICIENCIA FOTOQUIMICA cte.
T_REF	30,0	TEMPERATURA DE REFERENCIA $^{\circ}\text{C}$
ADS	100,0	ÁGUA DISPONÍVEL INICIAL DO SOLO mm

APÊNDICE B

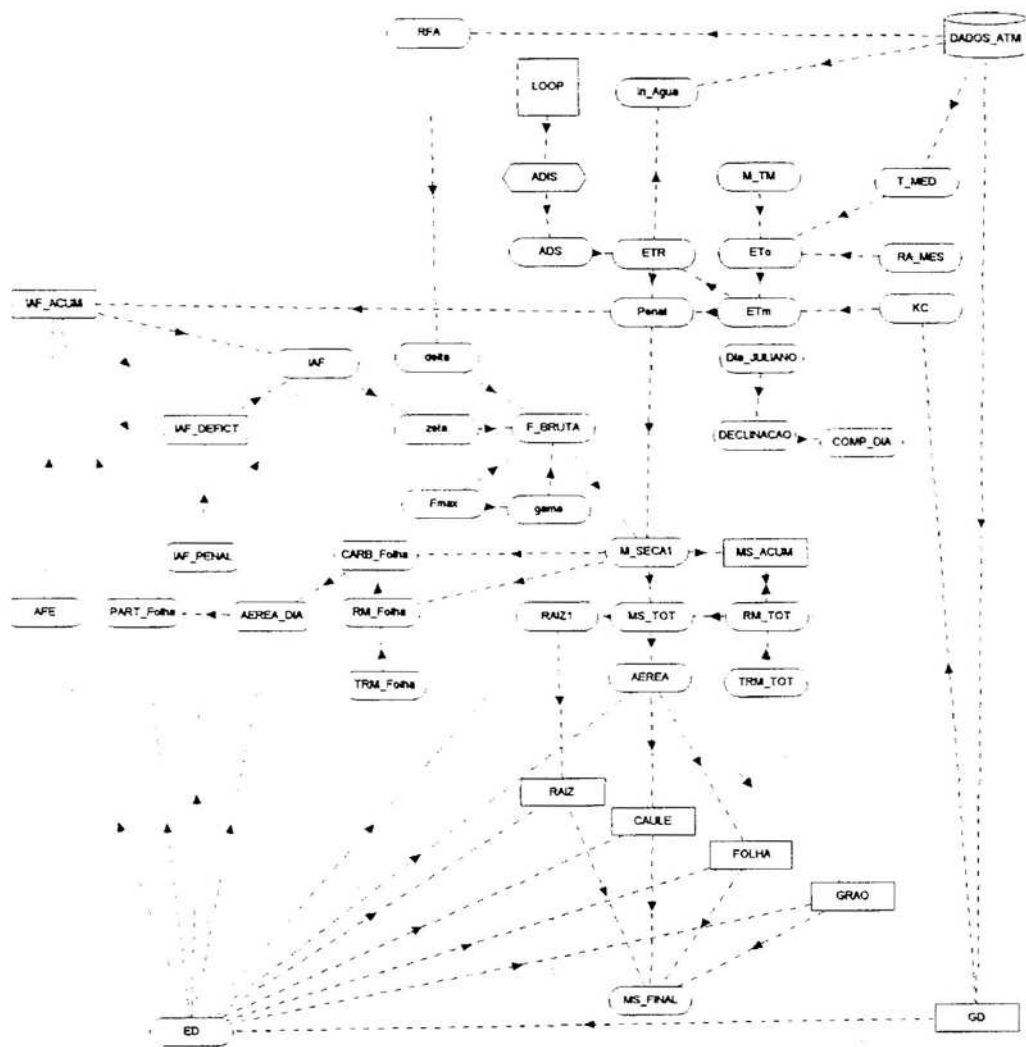


Figura 1B - Fluxograma esquemático representativo do modelo SOYCLIMA.

APÊNDICE C

Listagem do Modelo e Seus Respectivos Compartimentos

Compartimento: GD Variável Global

Cálculo dos Graus Dias (°C)

$$dGD/dt = (maxima + minima)/2 - 10$$

Compartimento: MS_ACUM

Materia Seca Total ($kg_{(ms)}.m^{-2}$)

$$dMS_ACUM/dt = M_SECA1-RM_TOT$$

Compartimento: GRÃOS Variável Condicional

Matéria Seca dos Grãos ($kg_{(ms)}.m^{-2}$)

$$dGRAO/dt =$$

1. AEREA for $ED \geq 1.70$

0,45. AEREA for $ED \geq 1.50$

0,27. AEREA for $ED \geq 1.30$

0,13. AEREA for $ED \geq 1.15$

0. AEREA for $ED \geq 0$

0 default

Compartimento: FOLHA Variável Condicional

Matéria Seca da Folha ($kg_{(ms)}.m^{-2}$)

$$dFOLHA/dt =$$

aerea.0 for $ED \geq 1.70$

aerea.0,27 for $ED \geq 1.50$

aerea.0,46 for $ED \geq 1.30$

aerea.0,60 for $ED \geq 1.15$

aerea.0,75 for $ED \geq 1$

aerea.0,75 for $ED \geq 0$

0 = default

Compartimento: CAULE Variável Condicional

Matéria Seca do Caule ($kg_{(ms)}.m^{-2}$)

$$dCAULE/dt =$$

aerea.0 for $ED \geq 1,70$

aerea.0,28 for $ED \geq 1,50$

aerea.0,27 for $ED \geq 1,30$

aerea.0,27 for $ED \geq 1,15$

aerea.0,25 for $ED \geq 1$

aerea.0,25 for $ED \geq 0$

0 = default

Compartimento: RAIZ Variável Condicional

Matéria Seca das Raízes ($\text{kg}_{(ms)} \cdot \text{m}^{-2}$)

$d\text{RAIZ}/dt =$

1.raiz1 for $ed \geq 1,50$

0,9.raiz1 for $ed \geq 0,75$

0,50.raiz1 for $ed \geq 0$

0 = default

Compartimento: IAF_ACUM Variável Condicional Global

Índice de área foliar acumulado ($\text{m}^2_{\text{folha}} \cdot \text{m}^{-2}_{\text{solo}}$)

$d\text{IAF_ACUM}/dt =$

PART_LEAF.AFE for $\text{penal} \geq 1$

PART_LEAF.AFE.(penal.0,9) = default

Compartimento: IAF_DEFICT

Diferença entre o IAF real e o penalizado, integrado no tempo ($\text{m}^2_{\text{folha}} \cdot \text{m}^{-2}_{\text{solo}}$)

$d\text{IAF_DEFICT}/dt =$

IAF_ACUM-IAF_PENAL

Variável: AEREA Variável Condicional

Partição de MS para a parte aérea da planta ($\text{kg}_{(ms)} \cdot \text{m}^{-2}$)

AEREA =

1.MS_TOT for $ED \geq 1,50$

0,9.MS_TOT for $ED \geq 0,75$

0,50.MS_TOT for $ED \geq 0$

0 = default

Variável: AEREA_DIA Variável Condicional

Partição do Carbohidrato para a parte aérea da planta ($\text{kgCO}_2 \cdot \text{kg}_{(ms)}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)

AEREA_DIA =

1.CARB_DIA_Leaf for $ED \geq 1,50$

0,9.CARB_DIA_Leaf for $ED \geq 0,75$

0,50.CARB_DIA_Leaf for $ED \geq 0$

0 = default

Variável: AFE Variável Condicional

Varição da área foliar específica ao longo de estágio de desenvolvimento ($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)

AFE =

6 for $ed > 1,5$

15 for $ed > 1$

20 for $ed > 0,45$

12 = default

Variável: ADS Variável Condicional

Água disponível no solo (mm)

ADS =

100 for ADS>100

ADS = Default

Variável: COMP_DAY

Variação do Comprimento do Dia Local ao longo do Plantio (horas)

COMP_DAY = (arccos(-tan(rad(lat)).tan(DECLINACAO)))/pHi.24

Variável: CARB_Folha

Carboidrato diário que vai para a folha ($\text{kgCO}_2.\text{kg}_{(\text{ms})}^{-1}.\text{d}^{-1}$)

CARB_Folha = M_SECA1-RM_Folha

Variável: DECLINACAO Adimensional

Declinação Solar no Local Capinópolis, (Função Do Dia Juliano) (em graus)

DECLINACAO = arcsin(0,3978.sin(JU_DAY))

Variável: Fmax

Fotossíntese Máxima ($\text{kgCO}_2.\text{m}^{-2}.\text{d}^{-1}$)

Fmax = pm30.((media-tb)/(30-tb))

Variável: Delta

Componente da Fotossíntese Bruta (Adimensional)

delta = e_foto.kdif.RAF.h⁻¹

Variável: ED Variável Condicional

Estádio de Desenvolvimento (Adimensional)

ED = ((gd-709)/(1472-709))+1 for gd>=709

gd/702 = default

Variável: ETM

Evapotranspiração Máxima da Cultura (quando não ha restrição de água.
($\text{mm}.\text{d}^{-1}$))

ETM = KC.ETo

Variável: ETo

Evapotranspiração de Referência ($\text{mm}.\text{d}^{-1}$)

ETo = 0,0023.RA_MES.(T_MED+17,8).M_TM^0,50

Variável: ETR
Evapotranspiração Real(mm.d⁻¹)
ETR = ETm.ADS.CC⁻¹

Variável: F_BRUTA
Cálculo da Fotossíntese Bruta (kgCO₂.m⁻².d⁻¹)
F_BRUTA=(Fmax.h/kdif) . ln((delta+gama+(2.delta.gama+gama^2)^1/2)/(delta.
zeta+gama+ (2.delta.gama.zeta+gama^2)^1/2))

Variável: Gama
Componente da Fotossíntese Bruta (Adimensional)
gama = (1-m).Fmax

Variável: IAF Variável Condicional Global
IAF com a Senescência (m²_{folha}.m⁻²_{solo})
IAF =
0 for iaf_defict>=iaf_penal
IAF_ACUM-iaf_defict default

Variável: IAF_PENAL Variável Condicional Global
Penalizado a partir do florescimento (m²_{folha}.m⁻²_{solo})
IAF_PENAL =
IAF_ACUM.0,985 for ed>1
IAF_ACUM = default

Variável: In_Agua
Precipitação efetiva: entra-sai (mm)
In_Agua = 0,75.prp-etr

Variável: JU_DAY
Cálculo a partir do dia Juliano do componente do cálculo da Declinação Local
da Latitude em Estudo (Adimensional)
JU_DAY = p.(t+JDAY-80)+0,0335.(sin(p.t+JDAY)-sin(80.p))

Variável: KC Variável Condicional
Coeficiente da Cultura nos Estádios de Desenvolvimento (Adimensional)
KC =
0,45 for GD>=1493
0,75 for GD>=919
1,08 for GD>=702
0,75 for GD>=57,1
0,35 for GD>=12,4
1 = default

Variável: MS_TOT Variável Condicional
Matéria seca restante depois de respirada ($\text{kg}_{(\text{ms})} \cdot \text{m}^{-2}$)
MS_TOT =
0 for m_seca1 <= rm_tot
M_SECA1 - RM_TOT default

Variável: M_SECA1
Conversão da Fotossíntese Bruta em Carbohidratos ($\text{kg}_{(\text{ms})} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)
M_SECA1 = F_BRUTA.30/44.eg.penalties

Variável: MS_FINAL
Matéria Seca Total ($\text{kg}_{(\text{ms})} \cdot \text{m}^{-2}$)
MS_FINAL = CAULE+FOLHA+GRAO+RAIZ

Variável: M_TM
Media das Temperaturas Medias ($^{\circ}\text{C}$)
M_TM = TMmax - TMmin

Variável: PART_Folha Variável Condicional
Partição dos carbohidratos a partir da parte aérea para as folhas ($\text{kgCO}_2 \cdot \text{kg}_{(\text{ms})}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)
PART_Folha =
AEREA_DIA.0 for ED >= 1,70
AEREA_DIA.0,01 for ED >= 1,70
AEREA_DIA.0,27 for ED >= 1,50
AEREA_DIA.0,46 for ED >= 1,30
AEREA_DIA.0,60 for ED >= 1,15
AEREA_DIA.0,75 for ED >= 1
AEREA_DIA.0,75 for ED >= 0
0 = default

Variável: PENAL
Penalização pelo Déficit Hídrico (Adimensional)
PENAL = ETR.ETM⁻¹

Variável: RM_Folha
Respiração de Manutenção para a Folha ($\text{kgCO}_2 \cdot \text{kg}_{(\text{ms})}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)
RM_Folha = TRM_DIA_Leaf.M_SECA1

Variável: RM_TOT
Respiração de Manutenção ($\text{kgCO}_2 \cdot \text{kg}_{(\text{ms})}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)
RM_TOT = TRM_TOT.MS_ACUM

Variável: RAIZ1 Variável Condicional

Partição de MS para a parte aérea da planta($\text{kg}_{(\text{ms})} \cdot \text{m}^{-2}$)

RAIZ1 =

0.MS_TOT for $\text{ED} \geq 1,50$

0,1.MS_TOT for $\text{ED} \geq 0,75$

0,50.MS_TOT for $\text{ED} \geq 0$

0 = default

Variável: RAF

Radiação Fotossinteticamente ativa ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$)

RAF = RADIACAO.0,5

Variável: T_MED

Temperatura media ($^{\circ}\text{C}$)

$T_{\text{MED}} = (\text{máxima} + \text{mínima}) \cdot 2^{-1}$

Variável: TRM_TOT

Taxa da Respiração de Manutenção. ($\text{kgCO}_2 \cdot \text{kg}_{(\text{ms})}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)

$\text{TRM}_{\text{TOT}} = \text{rm30} \cdot \text{Q}10^{((\text{media} - T_{\text{REF}})/10)}$

Variável: TRM_Folha

Taxa da Respiração de Manutenção para a Folha. ($\text{kgCO}_2 \cdot \text{kg}_{(\text{ms})}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)

$\text{TRM}_{\text{Folha}} = \text{rm30} \cdot \text{Q}10^{((\text{media} - T_{\text{REF}})/10)}$

Variável: zeta

Componente da Fotossíntese Bruta (Adimensional)

$\text{zeta} = \exp(-\text{kdif} \cdot \text{iaf})$

Evento Independente: LOOP

Loop do cálculo do acúmulo de água no solo

Período: 1

Iniciando em: 1

Ações:

$\text{ADS} = \text{ADS} + \text{In}_{\text{Agua}}$

Lookup: DADOS_ATM

Banco de Dados Climáticos do Local Estudado