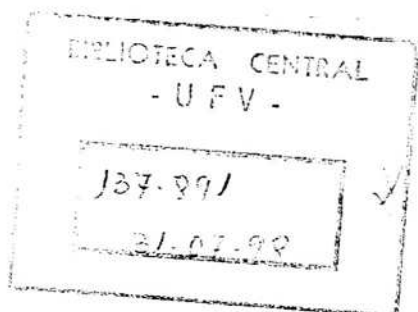


ALEXANDRE HUGO CEZAR BARROS

ANÁLISE DO CRESCIMENTO, DO DESENVOLVIMENTO E DA
PRODUTIVIDADE DA CULTURA DO MILHO (*Zea mays* L.):
EXPERIMENTOS E MODELOS

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



BOAÇÃO

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
FEVEREIRO – 1998

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

T

B277p
1998

Barros, Alexandre Hugo Cezar, 1965-

Análise do crescimento, do desenvolvimento e da produtividade da cultura do milho (*Zea mays* L.): Experimentos e modelos / Alexandre Hugo Cezar Barros. -- Viçosa : UFV, 1998.

85p. : il.

Orientador: Luiz Cláudio Costa

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, 1997

1. Milho - Crescimento - Modelo agrometeorológico. 2. Milho - Crescimento - Simulação (Computação). 3. Milho - Desenvolvimento - Modelo agrometeorológico. 4. Milho - Produtividade. 5. Milho - Respiração. 6. Milho - Efeito do clima. 7. Milho - Matéria seca.

CDD.19.ed. 630.2515

CDD.20.ed. 630.2515

ALEXANDRE HUGO CEZAR BARROS

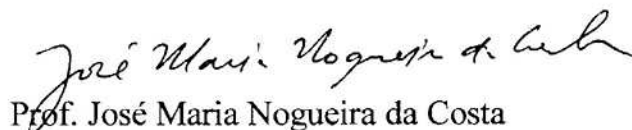
ANÁLISE DO CRESCIMENTO, DO DESENVOLVIMENTO E DA
PRODUTIVIDADE DA CULTURA DO MILHO (*Zea mays* L.):
EXPERIMENTOS E MODELOS

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

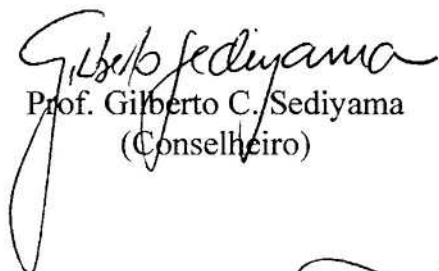
APROVADA: 30 de junho de 1997.



Prof. Aristides Ribeiro



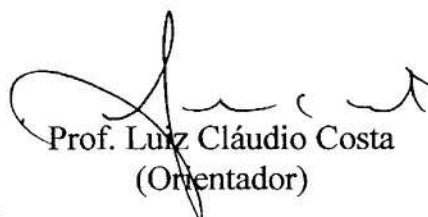
Prof. José Maria Nogueira da Costa



Prof. Gilberto C. Sedyama
(Conselheiro)



Prof. Antônio Alves Soares



Prof. Luiz Cláudio Costa
(Orientador)

A DEUS, princípio de tudo.
À minha mãe Maria José Cezar.
Ao meu pai Clodoaldo de Souto Barros (*in memoriam*).
À minha esposa Zilmar e ao meu filho João Lucas.
Aos meus irmãos Andrea, Adriane e André.
Aos meus sobrinhos Matheus e Marcelo.
Com todo o meu amor.

AGRADECIMENTO

Em especial, ao professor Luís Cláudio Costa, pela orientação, que proporcionou o aprofundamento e a melhoria deste trabalho.

Aos professores Gilberto Chohaku Sedyama, Carlos Ramirez Franco da Encarnação, Everardo Chartunin Mantovani, José Maria Nogueira da Costa, Antonio Alves Soares e Aristides Ribeiro, pelo apoio e pelas sugestões.

Ao professor Mário Adelmo Varejão Silva, à pesquisadora Maria de Jesus Nogueira Aguiar e ao técnico Ivanildo Silva Leite, que sempre contribuíram para o meu aperfeiçoamento técnico e pessoal.

Aos pesquisadores Augusto S. Sampaio Arcoverde (*in memoriam*) e Antonio Raimundo e ao técnico José Orlando Arcanjo da Silva, da Estação Experimental de Vitória de Santo Antão, pelo apoio, pela ajuda e pelas sugestões para realização deste trabalho.

Aos pesquisadores José Nildo Tabosa, José Pereira Leite e Venezio Felipe dos Santos, pela colaboração e pelas sugestões para o aperfeiçoamento deste trabalho.

Em especial, à Empresa Pernambucana de Pesquisa Agropecuária – IPA, e 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 de fazer o curso de Meteorologia Agrícola.

Ao Sr. José Dantas Pimenta (*in memoriam*), à Sra. Dilza e a Sussane Meireles, Wagner Pinto e Marcelino Vital, pelo apoio e incentivo e por me tornar um dos membros da família.

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

A todos os pesquisadores e funcionários do Departamento de Meteorologia e Recursos Hídricos do IPA, pelo incentivo e pela colaboração.

Todo objetivo alcançado é embasado em firme alicerce, cuja construção nós não edificamos sozinhos. Assim, expresso meus sinceros agradecimentos, pelos primeiros ensinamentos, aos professores do Educandário São José e do Colégio Evangélico XV de Novembro. A todos os amigos do curso de Meteorologia Agrícola, em especial a Carlos (Papagaio), Marcelo, Adriana, Wagner, Silvano, Williams, Tarcísio, Ana, Alesandra, Delton, Fúlvio e Joaquim. Aos amigos de república, Ronaldo, Tarcílio, Fernando, Gilson, Marcos, Prates, Carlos, Edísio, Solon e Weber. Aos amigos do hotel, Fernando (Bczourão), Marchal, Maurício e Juliana.

BIOGRAFIA

ALEXANDRE HUGO CEZAR BARROS, filho de Clodoaldo de Souto Barros e Maria José Cezar, nasceu no dia 19 de abril de 1965, em Garanhuns, no Estado de Pernambuco.

Em 1990, concluiu o curso de Agronomia pela Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE. Neste mesmo ano foi contratado pela Empresa Pernambucana de Pesquisa Agropecuária - IPA, onde trabalha atualmente.

Em março de 1995, iniciou o curso de pós-graduação em Meteorologia Agrícola, em nível de mestrado, na Universidade Federal de Viçosa, UFV.

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

CONTEÚDO

LISTA DE QUADROS.....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xiii
EXTRATO.....	xiv
ABSTRACT.....	xvi
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. A cultura do milho.....	1
1.2. Fisiologia da cultura do milho.....	2
1.3. Modelos.....	4
1.3.1. Tipos e classificação.....	5
1.3.2. Aplicação dos modelos de simulação para crescimento, desenvolvimento e produtividade.....	7
1.3.3 Calibração, teste e análise de sensibilidade de modelos.....	8
1.3.4. Importância e vantagens no uso de modelos.....	9
1.3.5. Estrutura da tese.....	10
2. EXPERIMENTO DE CAMPO.....	12
2.1. Experimento.....	12
2.2. Amostragem e determinações.....	14
2.3. Elementos climáticos.....	15

2.4. Resultados e discussões.....	18
2.4.1. Crescimento e desenvolvimento	18
2.4.2. Matéria seca total	19
2.4.3. Matéria seca das folhas	20
2.4.4. Matéria seca do caule	21
2.4.5. Matéria seca das raízes.....	22
2.4.6. Índice de área foliar.....	22
2.4.7. Distribuição de matéria seca.....	23
2.4.8. Produtividade de grãos	24
2.4.9. Conclusões.....	25
3. DESENVOLVIMENTO DO MODELO.....	27
3.1. Métodos matemáticos de simulação	27
3.1.1. Fotossíntese.....	28
3.1.2. Respiração, crescimento e manutenção da cultura	30
3.1.3. Desenvolvimento fenológico da cultura	32
3.1.4. Partição de fotoassimilados	33
3.1.5. Índice de área foliar.....	34
3.1.6. Senescência.....	35
3.1.7. Acúmulo de matéria seca.....	36
3.2. Descrição do modelo.....	36
3.2.1. Ajustes do modelo.....	37
4. TESTE E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MODELO	39
4.1. Teste do modelo	39
4.1.1. Introdução	39
4.1.2. Metodologia.....	40
4.2. Resultados e discussões.....	40
4.2.1. Acúmulo de matéria seca - parte aérea observada e simulada	40
4.2.2. Acúmulo de matéria seca das folhas observada e simulada.....	42
4.2.3. Acúmulo de matéria seca do caule observada e simulada.....	43
4.2.4. Acúmulo de matéria seca das raízes observada e simulada	45
4.2.5. Índice de área foliar observado e simulado	46

4.2.6 Área foliar específica	48
4.2.7 Produtividade de grãos observada e simulada	49
4.2.8 Análise de consistência do modelo	51
4.3. Testes de sensibilidade	52
4.3.1. Eficiência fotossintética (Alpha).....	52
4.3.2. Fotossíntese máxima (Pmax).....	53
4.3.3. Respiração de manutenção (Rm)	54
4.3.4. Respiração de crescimento (Eg).....	55
4.3.5. Coeficiente de extinção (k).....	56
4.3.6. Coeficiente de transmissão (m).....	57
4.3.7. Taxa de reação bioquímica (Q10).....	58
4.3.8. Área foliar específica (AFE).....	59
4.4. Otimização dos parâmetros do modelo	60
4.4.1. Resultados simulados e calculados após a otimização do modelo	62
RESUMOS E CONCLUSÕES	64
RECOMENDAÇÕES.....	66
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68
APÊNDICE	78

LISTA DE QUADROS

- Quadro 1 - Identificação dos estádios de desenvolvimento de uma cultura de milho (*Zea mays* L.), segundo HANWAY (1963)..... 4
- Quadro 2 - Características climáticas do Município de Vitória de Santo Antão, PE, 1996 13
- Quadro 3 - Época de ocorrência dos estádios fenológicos do cultivar de milho BR 3056, expressa em número de dias depois da emergência (DDE) e em graus dia acumulados (GD), a partir da emergência. 18
- Quadro 4 - Análise de variância para otimização dos parâmetros Pm e Rm. 62
- Quadro 5 - Resultados finais observados e calculados pelo modelo, do acúmulo de matéria seca da parte aérea, do caule, das folhas, das raízes, dos órgãos reprodutivos, da produtividade final de grão e o índice de área foliar máximo, depois da otimização dos parâmetros Pm e Rm..... 63

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação da área experimental na Estação de Vitória de Santo Antão.....	13
Figura 2 - Totais de precipitação (mm), em função dos números de dias depois da emergência (DDE).....	16
Figura 3 - Temperaturas (°C) máxima, mínima e média do ar, em função dos números de dias depois da emergência (DDE).....	17
Figura 4 - Total diário de radiação solar global ($\text{MJ/m}^2\text{dia}^{-1}$), em função dos números de dias depois da emergência (DDE).....	17
Figura 5 - Acúmulo de matéria seca total (gm^{-2}), em função do número de dias depois da emergência (DDE).....	20
Figura 6 - Índice de área foliar, em função do número de dias depois da emergência (DDE).....	23
Figura 7 - Distribuição de matéria seca, em função do número de dias depois da emergência (DDE).....	24
Figura 8 - Diagrama esquemático do modelo de crescimento, desenvolvimento e produtividade da cultura do milho. Os retângulos representam a quantidade e taxa; os círculos, os dados de entrada; os quadrados, as variáveis auxiliares; o triângulo, uma decisão; e as linhas, os fluxos de informações.....	38

Figura 9 - Matéria seca total da parte aérea do milho BR 3056, observada e simulada	41
Figura 10 - Matéria seca total das folhas do milho BR 3056, observada e simulada.....	43
Figura 11 - Matéria seca total do caule do milho BR 3056, observada e simulada.....	45
Figura 12 - Matéria seca total das raízes do milho BR 3056, observada e simulada.....	46
Figura 13 - Índice de área foliar do cultivar de milho BR 3056, observado e simulado.....	47
Figura 14 - Área foliar específica do cultivar de milho BR 3056, observada e atribuída pelo modelo	49
Figura 15 - Distribuição de matéria seca dos órgãos reprodutivos observada e simulada (palha, grão e espiga) do cultivar de milho BR 3056....	50
Figura 16 - Análise de sensibilidade da matéria seca parte aérea, das folhas, do caule e da produtividade final de grãos, relativa à eficiência fotossintética	53
Figura 17 - Análise de sensibilidade da matéria seca da parte aérea, das folhas, do caule e da produtividade final de grãos, relativa à fotossíntese máxima (Pmax).....	54
Figura 18 - Análise de sensibilidade da matéria seca da parte aérea, das folhas, do caule e da produtividade de grãos, relativa à respiração de manutenção (Rm).....	55
Figura 19 - Análise de sensibilidade da matéria seca da parte aérea, das folhas, do caule e da produtividade de grãos, relativa à eficiência de conversão	56
Figura 20 - Análise de sensibilidade da matéria seca da parte aérea, das folhas, do caule e da produtividade de grãos, relativa ao coeficiente de extinção da cultura (k)	57
Figura 21 - Análise de sensibilidade da matéria seca da parte aérea, das folhas, do caule e da produtividade de grãos, relativa ao coeficiente de transmissão da radiação para cultura	58

Figura 22 - Análise de sensibilidade da matéria seca da parte aérea, das folhas, do caule e da produtividade de grãos, relativa à taxa de reações bioquímicas (Q10)	59
Figura 23 - Análise de sensibilidade da matéria seca da parte aérea, das folhas, do caule e da produtividade de grãos, relativa à área foliar específica (SLA)	60

LISTA DE SÍMBOLOS

∞ = eficiência fotossintética da folha

D = desenvolvimento

Eg = eficiência de conversão de carboidratos em matéria seca estrutural

g = grama

GD = graus-dia

h = período de integração da fotossíntese bruta diária

ha = hectare

IAF = índice de área foliar

k = coeficiente de extinção da luz da cultura

Kg = quilograma

m = coeficiente de transmissão da luz da cultura

m² = metro quadrado

Par = radiação fotossinteticamente ativa

PE = peso específico das folhas

Pm20 = fotossíntese bruta máxima a 20 °C

Q10 = taxa de reação bioquímica

Rm20 = respiração de manutenção máxima a 20 °C

AFE = área foliar específica

Tb = temperatura-base da cultura

EXTRATO

BARROS, Alexandre Hugo Cezar, M.S., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 1998. **Análise do crescimento, do desenvolvimento e da produtividade da cultura do milho (*Zea mays* L.): experimentos e modelos.** Orientador: Luiz Cláudio Costa. Conselheiros: Gilberto Chohaku Sedyama e Everardo Chartuni Mantovani.

Desenvolveu-se um modelo agrometeorológico para simular o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade da cultura do milho (*Zea mays* L.). O modelo foi testado com os dados obtidos na Estação Experimental de Vitória de Santo Antão - PE. Três partes principais constaram do modelo. Na primeira foram computados os ganhos energéticos, representados pela fotossíntese. Na segunda, as perdas do sistema relativas à respiração de manutenção e crescimento. Após o estabelecimento do incremento diário de matéria seca para as diversas partes da planta, na terceira parte, procurou-se estabelecer as relações com o incremento da área foliar. Levaram-se em consideração as interações das condições meteorológicas e o estado fisiológico das plantas. As pressuposições fundamentaram-se em resultados disponíveis na literatura. O modelo proposto mostrou-se consistente para simular o crescimento,

o desenvolvimento e a produtividade da cultura do milho, sendo similar aos valores obtidos experimentalmente. Os parâmetros mais sensíveis no modelo foram a eficiência fotossintética e a respiração de manutenção.

ABSTRACT

BARROS, Alexandre Hugo Cezar, M.S., Universidade Federal de Viçosa, February 1998. **Analysis of growth, development and productivity in maize (*Zea mays* L.): Experiments and Models.** Adviser: Luiz Cláudio Costa. Committee Members: Gilberto Chohaku Sedyama and Everardo Chartuni Mantovani.

An agrometeorological model was developed to simulate the growth, the development and the productivity of maize (*Zea mays* L.). The model was tested with data obtained at the Experimental Station of Vitória de Santo Antão - PE. The model consisted of three major parts. In the first part, the energetic gains represented by the photosynthesis were computed. In the second one, the system losses relative to the maintenance respiration and growth were evaluated. In the third one, after the establishment of the daily dry matter increment for the various plant parts, it was attempted to establish the relations with the foliar leaf increment. The interations of the meteorological conditions and the plant physiological estate. The presuppositions were based on the results available in the literature. The proposed model showed to be consistent to simulate the growth, the development and the productivity of maize cropping, being similar to those values which were experimentally obtained. The parameters most sensitive in the model were the photosynthetic efficiency and the maintenance respiration.

1. INTRODUÇÃO

1.1. A cultura do milho

A cultura do milho (*Zea mays* L.) é uma das mais difundidas no mundo, dada a sua importância na dieta alimentar humana e animal. No Brasil, o milho é plantado de norte a sul do País, ocupando uma área cultivada de aproximadamente 13 milhões de hectares (FUNDAÇÃO... – IBGE, 1992).

Apesar de apresentar um elevado potencial produtivo, o rendimento da cultura no Brasil é considerado baixo, devido à extrema dificuldade no processo de difusão e adoção de novas tecnologias de cultivo.

Enquanto a produtividade média brasileira é da ordem de 2.054 kg ha⁻¹, no Nordeste não ultrapassa 700 kg ha⁻¹ (IBGE, 1992). O potencial produtivo da cultura, no entanto, é superior a 10.000 kg/ha, quando irrigada, e ultrapassa 4.000 kg ha⁻¹, sob regime de sequeiro (BARROS, 1993). Nesse sentido, FANCELLI e LIMA (1986) destacaram que épocas adequadas de semeadura e escolha de cultivares mais adaptadas às condições regionais podem aumentar a produtividade da cultura, aproximando-a do potencial produtivo.

ROSENBERG et al. (1983) afirmaram que a extensão com que a cultura pode apresentar seu potencial genético é determinada por sua interação com o

regime de radiação solar, temperatura do ar, pressão de vapor d'água atmosférico, velocidade do vento e características físico-hídricas do solo.

A integração dos diversos fatores que afetam o rendimento agrícola da cultura — sem necessariamente estabelecer um experimento para cada variável a ser estudada — é possível, através de simulações (CHAN, 1992). De fato, vários países têm redirecionado o modo pelo qual vêm sendo propostos os trabalhos de pesquisa. Observa-se, nos últimos anos, uma crescente preocupação com trabalhos multidisciplinares e com a integração dos diversos fatores que afetam o rendimento agrícola. Há diversos programas estratégicos de pesquisa agropecuária que integram áreas afins, como solo, fisiologia vegetal, fitopatologia, agrometeorologia, irrigação, entre outras, que estão de algum modo relacionadas à produção (EMBRAPA, 1994).

Devido à acentuada diminuição na disponibilidade de recursos técnicos e financeiros para pesquisa e à necessidade de um período de tempo prolongado para a realização dos estudos, a experimentação científica tem sofrido restrições. Além disso, em face da grande variabilidade dos fatores ambientais que influenciam a produtividade agrícola, a validade dos resultados desses estudos fica muitas vezes restrita às características locais de áreas muito limitadas.

Com o presente trabalho, procurou-se associar técnicas de modelagem e experimentos, no sentido de obter resultados representativos para toda a faixa da Zona da Mata do Estado de Pernambuco. A utilização da variedade BR 3056 deveu-se à sua grande aceitação no Nordeste e ao seu elevado potencial produtivo.

1.2. Fisiologia da cultura do milho

O milho apresenta características fisiológicas favoráveis no que se refere à eficiência de conversão de carbono mineral — representado pelo gás carbônico da atmosfera — em compostos orgânicos como os carboidratos. Esse processo, que se realiza através da fotossíntese, consiste na bioconversão da energia solar

(SALISBURY, 1992). No milho, a grande eficiência de transformação de radiação solar em energia química deve-se ao processo fotossintético tipo C₄, no qual o CO₂ é continuamente concentrado nas células da bainha vascular das folhas e, em seguida, redistribuído para posterior utilização (TAIZ e ZEIGER, 1991). De modo geral, o transporte de produtos fotoassimilados depende das condições da planta e do ambiente.

Durante a fase vegetativa da planta, o fluxo de carboidratos se dá em direção aos sítios de consumo, que são representados pelos meristemas e pelos tecidos que apresentam intensa atividade biológica. À medida que a planta se desenvolve, o transporte dos metabólicos é dirigido para os tecidos de reprodução, que, em seguida, são redistribuídos, acumulando-se nos órgãos de armazenamento (PESSARAKLI, 1995).

No milho, o maior consumo dos produtos fotossintetizados ocorre durante a fase reprodutiva, sendo verificado nos órgãos em processo de rápido crescimento. Esse eficiente transporte de carboidrato, produzido e acumulado nas folhas, em direção aos grãos em formação, é de grande importância para garantir alta produção (PESSARAKLI, 1995).

Além das diferenças anatômicas e bioquímicas que existem entre as plantas que apresentam fotossíntese C₃ e C₄, ocorrem modificações fisiológicas, principalmente no que se refere ao processo de fotorrespiração. As plantas de fotossíntese C₃ perdem de 20 a 50% do carbono fixado devido à fotorrespiração, enquanto as plantas com fotossíntese C₄, como o milho, não apresentam liberação mensurável de CO₂ (MAGALHÃES e SILVA, 1978).

Muitos fatores afetam a distribuição de fotoassimilados ao longo do período de crescimento e desenvolvimento da cultura. Dependendo dos fatores genéticos e ambientais, o ciclo da cultura pode variar bastante. Em regiões extratropicais (épocas de maior fotoperíodo) o milho pode atingir a maturidade em torno de 100 dias depois da emergência; em condições tropicais, a maturidade é atingida entre 120 e 150 dias.

O acúmulo de matéria seca total do milho, no período inicial do ciclo vegetativo, é lento; em seguida, passa por uma fase de rápido acúmulo e,

finalmente, apresenta decréscimo na acumulação de matéria seca. O comportamento da matéria seca total é similar entre as variedades. No entanto, há evidências de que a cultura responde com maior produção de biomassa quando o ciclo varia entre 140 e 150 dias, com maior duração do período de desenvolvimento da área foliar (MAGALHÃES, 1979).

O desenvolvimento da cultura foi caracterizado conforme HANWAY (1963):

Quadro 1 - Identificação dos estádios de desenvolvimento de uma cultura de milho (*Zea mays* L.), segundo HANWAY (1963)

Estádio	Características verificadas na cultura do milho
0	do plantio à emergência das plantas no solo
1	quatro folhas completamente formadas
2	oito folhas completamente formadas
3	doze folhas completamente formadas
4	dezesseis folhas completamente formadas
5	pólen abrigado; início de estágio reprodutivo
6	estádio final de polinização
7	o grão apresenta aspecto pastoso
8	começo de enchimento de grãos propriamente dito.
9	todos os grãos completamente dentados
10	maturação fisiológica do grão

1.3. Modelos

Nos últimos anos, um número expressivo de novas tecnologias vem sendo desenvolvido, para melhorar o manejo e o planejamento da agricultura. Essas novas tecnologias incluem os sistemas geográficos de informações, o sensoriamento remoto e os modelos de simulação de crescimento, desenvolvimento e produtividade de culturas. A idéia holocenótica, associada à modelagem, ganha evidência quando se trata de identificar e quantificar os

fatores que direta ou indiretamente afetam a produtividade agrícola. Nesse contexto, o desenvolvimento de modelos surge com a necessidade de tentar relacionar as diversas áreas do conhecimento científico (MIGLIORANZA, 1992).

Apesar da complexidade de se considerar o conceito holocenótico, é imprescindível incluir as inter-relações entre a planta e o meio. A planta, ou a comunidade vegetal, está condicionada, simultânea e coletivamente, por todos os fatores do ambiente.

No entanto, um modelo é apenas uma tentativa de representar um sistema ou um subsistema do mundo real. Tal representação é caracterizada pelos termos sistema, modelo e simulação. Por sistema entende-se que é uma parte limitada da realidade, que contém elementos inter-relacionados. Modelo é a representação simplificada de um sistema. Simulação é a arte de construir modelos matemáticos e o estudo de suas propriedades com relação às do sistema (WITT, 1982).

THORNLEY (1977) e REYNOLDS (1979) definem modelo matemático, ou simplesmente modelo, como uma equação, ou um conjunto de equações, que procura reproduzir numericamente um sistema real. THORNLEY (1977) acrescentou que o modelo deve assemelhar-se ao sistema e, se o sistema for dinâmico, deve, igualmente, ser capaz de considerar tais características.

1.3.1. Tipos e classificação

Devido à grande variabilidade de modelos desenvolvidos nos últimos anos, vários pesquisadores sentiram a necessidade de classificá-los, a fim de tornar sua estrutura e descrição mais claras.

Duas classificações de modelos são aplicadas ao estudo agrometeorológico envolvendo as interações clima, crescimento e rendimento das culturas: modelos empíricos ou estatísticos e modelos mecanísticos.

Os modelos empíricos procuram quantificar processos de causa-efeito e descrevem apenas as relações existentes entre as variáveis, sem se referirem a qualquer estrutura biológica ou física que possa existir entre as mesmas (REYNOLDYS e ACOCK, 1985). Desse modo, os modelos empíricos se

destinam a descrever as inter-relações planta-meio através de procedimentos puramente estatísticos.

WHISLER et al. (1986) apresentam uma ordem para classificar qualitativamente os modelos empíricos e afirmam que os mesmos podem ser úteis na representação de dados sumarizados e para previsões interpolativas.

THORNLEY (1977) acrescenta que a força preditiva desses modelos está restrita ao intervalo de condições experimentais, não podendo, portanto, fornecer informações sobre os eventuais mecanismos de causa e efeito envolvidos. Além disso, os resultados desses modelos são válidos apenas para a condição ambiental para a qual foram desenvolvidos e não devem ser extrapolados para outras situações (COSTA, 1988).

Os modelos mecanísticos procuram descrever os mecanismos responsáveis pelos fenômenos estudados, como a fotossíntese, a respiração, a partição de fotoassimilados para as diversas partes da planta e outros que estão envolvidos no crescimento e desenvolvimento da cultura. Nos modelos mecanísticos, as funções matemáticas representam o conhecimento e, ou, as hipóteses que relatam o comportamento observado dos fenômenos (THORNLEY, 1977).

Os modelos mecanísticos apresentam maior diversidade de tipos: estocásticos, determinísticos e dinâmicos. Os modelos estocásticos são aqueles baseados na probabilidade de ocorrência de alguns eventos e de variáveis exógenas. Nos modelos determinísticos não existem graus de probabilidade associados às respostas. Finalmente, os modelos dinâmicos são aqueles que procuram descrever as variações no tempo.

A grande maioria dos inúmeros modelos desenvolvidos nos últimos anos é uma combinação dos tipos mecanístico, dinâmico e determinístico. Na estrutura desses modelos, procura-se obter respostas quanto aos mecanismos espaço-temporais envolvidos e quantificar um valor para cada resposta.

É importante salientar que, embora os modelos empíricos não descrevam as inter-relações planta - meio, muitas funções empíricas são utilizadas nos modelos mecanicistas, determinísticos e dinâmicos, como os graus-dia e a interceptação da radiação.

1.3.2. Aplicação dos modelos de simulação para crescimento, desenvolvimento e produtividade

A aplicação de modelos empíricos na agricultura começou com FISCHER (1924), analisando a influência da chuva sobre a produção de trigo em Rothamsted, Inglaterra.

Nas décadas de 70 e 80, os modelos matemáticos, baseados nos processos fisiológicos e estatísticos, foram desenvolvidos para previsão de safra das principais culturas (BAIR, 1973; MACHADO, 1981; CAMARGO, 1984; FRANCE e THORNLEY, 1984; COSTA, 1988). Tais modelos procuram simular o crescimento e o desenvolvimento das plantas, usando relações baseadas na teoria estatística e fisiológica, como a fotossíntese, a respiração, a produção de biomassa, a produtividade de grãos e o uso de água pela cultura. Nesse mesmo período, foram desenvolvidos modelos especificamente destinados a simular a produtividade da cultura do milho (CURRY e CHEN, 1971; SPLINTER, 1974; WITT et al., 1978; ROBERTSON, 1983).

No final dos anos 80, uma série de modelos de simulação dos processos fisiológicos de culturas, chamada CERES (*Crop Environment Resource Synthesis*), foi desenvolvida pelo *Grassland, Soil and Water Research Laboratory* (JONES e KINIRY, 1986). O modelo para o milho, o CERES-Maize, tem sido testado em diversos países com resultados consistentes de estimativa e previsão de rendimento de grãos (HODGES e EVANS, 1992).

No Brasil, o CERES-Maize foi testado por LIU et al. (1989), utilizando dados meteorológicos e dados de solo e da cultura do milho híbrido DINA 10. Os resultados mostraram que o rendimento de grãos estimados pelo modelo apresentou erros na ordem de 2 a 10%, quando comparado com os rendimentos observados. LIMA (1995) calibrou esse modelo para as condições tropicais do Brasil e alcançou resultados significativos na distribuição de matéria seca total e no rendimento de grãos.

O nível de detalhe dos modelos desenvolvidos nas duas últimas décadas apresenta grandes variações. Se por um lado há modelos que apresentam uma

análise dos vários níveis de organização em um sistema de produção — que vão desde o bioma até a molécula (ACOCK e ACOCK, 1991) — ,por outro, há modelos baseados apenas no uso eficiente de radiação, assim como na fotossíntese e na respiração (GOUDRIAN e LAAR, 1994).

De fato, o nível de detalhamento nos modelos de simulação vem aumentando, devido (a) ao próprio desenvolvimento científico e (b) aos crescentes recursos computacionais, que possibilitam a interação de um número cada vez maior de variáveis ambientais. No entanto, o aumento da complexidade, muitas vezes, não necessariamente responde aos objetivos da pesquisa. Dessa forma, o modelo deve representar com clareza o sistema, reproduzir com adequada precisão suas interações e ser capaz de simular suas propriedades sem exagerado detalhamento. Com isso, otimizam-se o custo de desenvolvimento do modelo e o tempo de processamento necessário.

1.3.3 Calibração, teste e análise de sensibilidade de modelos

A calibração de modelos consiste em uma série de ajustes dos parâmetros, de forma que os dados calculados sejam representativos com relação aos dados observados (PENNING De VRIES, 1987). Dessa forma, a eficácia de um modelo é aperfeiçoada pela calibração feita com os dados experimentais de campo (WITT e GROUDRIAN, 1978). Entretanto, esses autores chamam a atenção para o fato de que essa técnica, quando mal utilizada, é bastante perigosa, tendo em vista que o número de parâmetros do modelo é superior ao dos dados experimentais. A aplicação indiscriminada de parâmetros pode conduzir a um perfeito ajuste, porém sem nenhum valor científico e sem nenhuma utilidade prática (PENNING De VRIES et al., 1989).

Os testes de um modelo consistem na comparação das predições com as observações em campo (COMERMA et al., 1985) e na análise de sensibilidade que verifica sua resposta à variação do seu valor. Deve-se, ainda, considerar o comportamento do modelo em diversas condições ambientais (REYNOLDS, 1979). De fato, as constantes mudanças do meio ambiente alteram o

comportamento da comunidade vegetal, e o teste de sensibilidade visa inferir o efeito de tais mudanças.

THORNLEY (1977) discrimina o teste do modelo em dois níveis: a predição e a hipótese (suposição).

1.3.4. Importância e vantagens no uso de modelos

Os modelos tentam simular o comportamento de uma parte do mundo real. Apesar da própria definição de modelo ser restrita a apenas uma parte, os modelos resgatam o conceito de que as partes estão relacionadas com o todo. Verifica-se que, em muitos casos, os modelos procuram responder as inter-relações a que está submetido o sistema real.

Por conseguinte, há de considerar que a importância dos modelos de simulação reside no fato de ele ser capaz de procurar as próprias respostas, levando em conta a natureza das interações a que está submetido o mundo real. Dessa forma, a tentativa de simular um sistema real pode ajudar a detectar áreas onde o conhecimento científico e os dados são escassos e, ainda, resumir convenientemente uma série de informações de utilidade prática.

Os modelos, ainda, estimulam o trabalho em equipe, devido à necessidade de unir o conhecimento científico em diagramas multidisciplinares. A elaboração destes diagramas, muitas vezes, provoca novas idéias na concepção e no discernimento entre hipóteses alternativas (PEREIRA, 1987).

Considerando o grande impulso que os modelos fornecem à pesquisa agrometeorológica, torna-se extremamente necessário desenvolvê-los levando em consideração as condições do Brasil. Além de seu potencial de uso nas atividades agrícolas, tais modelos permitiriam identificar os campos de investigação científica e estabelecer critérios para a implementação de pesquisas experimentais.

Neste trabalho, foi desenvolvido um experimento de campo com a cultura do milho, para acompanhar o crescimento, o desenvolvimento e o rendimento da cultura. Nesse sentido, o presente trabalho teve como objetivos:

1. Desenvolver um modelo de simulação de crescimento, desenvolvimento e produtividade da cultura do milho (*Zea mays* L.) para a região da Zona da Mata de Pernambuco.
2. Testar o modelo com os dados obtidos na Estação Experimental de Vitória de Santo Antão, PE, localizada na região da Zona da Mata do Estado de Pernambuco.
3. Analisar a sensibilidade de parâmetros e variáveis utilizadas no modelo.
4. Determinar quais fatores fisiológicos, ambientais e físicos são mais relevantes à pesquisa experimental, para elaboração de modelos matemáticos.

Este trabalho é parte de uma linha de pesquisa sobre modelagem agrometeorológica que vem sendo desenvolvida no Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa – UFV e no Departamento de Meteorologia e Recursos Hídricos da Empresa Pernambucana de Pesquisa Agropecuária – IPA.

1.3.5. Estrutura da tese

O presente trabalho é estruturado de modo que sejam analisados, seqüencialmente, os dados observados relativos ao experimento de campo realizado na Estação Experimental de Vitória de Santo Antão, Pernambuco, assim como os resultados simulados, através do modelo desenvolvido, para análise do crescimento, do desenvolvimento e da produtividade da cultura do milho.

O item 2 descreve os métodos utilizados para execução do experimento, principalmente aqueles relativos a amostragens e determinações. Neste item são, ainda, apresentados e discutidos os resultados obtidos no campo experimental.

O item 3 trata dos métodos matemáticos utilizados nas simulações e no desenvolvimento do modelo.

No quarto item, foram efetuados e discutidos os testes do modelo com os resultados observados e simulados. Os testes de sensibilidade e a otimização dos parâmetros são apresentados também neste capítulo.

Finalmente, são apresentados os resumos, as conclusões e as sugestões referentes à contribuição dos experimentos para os modelos e a maneira como os modelos podem definir melhor os experimentos em campo.

2. EXPERIMENTO DE CAMPO

2.1. Experimento

O trabalho de pesquisa experimental foi conduzido no período de 25 de março a 10 de julho de 1996, na Estação Experimental de Vitória de Santo Antão (8° 8' S; 35° 22' W ; 146 m), pertencente à Empresa Pernambucana de Pesquisa Agropecuária – IPA. A estação está localizada no Município de Vitória de Santo Antão – PE. O período chuvoso da região está compreendido entre os meses de março e junho, com precipitação pluvial total média anual de 895,8 mm e temperatura média anual do ar de 26,7°C (Quadro 2).

O experimento foi instalado em uma área de topografia pouco ondulada, em um latossolo vermelho-escuro.

A área experimental de 38 por 14 foi dividida em três parcelas de 10 m por 10 m, com 8 m por 4 m de bordadura, conforme ilustrado na Figura 1. Foi utilizado o cultivar CMS 26 BR 3056, seleção IPA, resultante do programa de melhoramento genético para a cultura do milho no Estado de Pernambuco. Suas características principais são: altura média, 230 cm; altura média de inserção de espiga, 125 cm; número médio de dias para atingir o florescimento, 65 dias; produtividade média, 2.500 a 4.500 kg ha⁻¹; tipo de grão, meio dente; cor do grão, amarela; e peso médio de 100 sementes, 32 g (IPA, 1994).

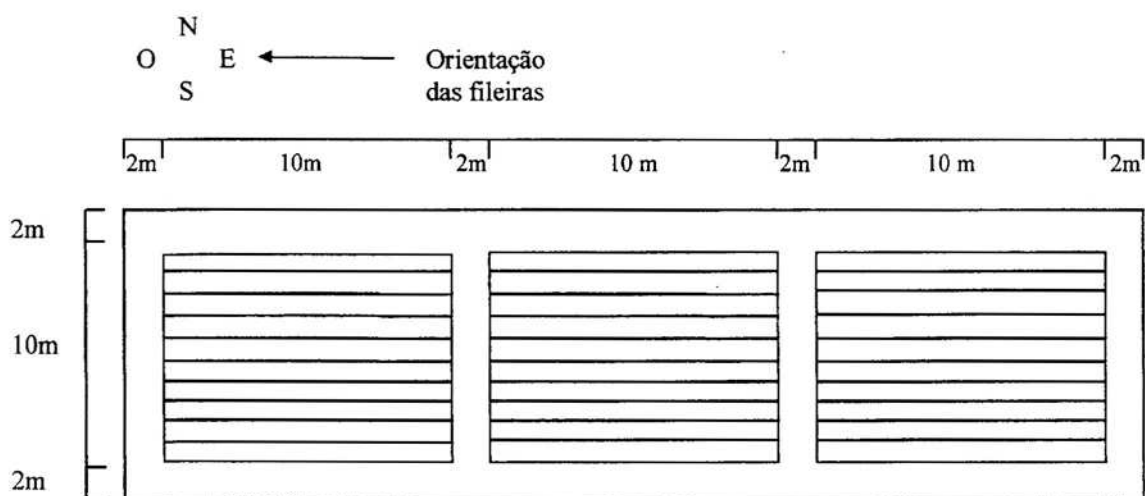


Figura 1 - Representação da área experimental na Estação de Vitória de Santo Antão.

Quadro 2 – Características climáticas do Município de Vitória de Santo Antão, PE, 1996^(*)

Elemento / mês	Março		Abril		Maio		Junho		Julho	
	Normal	1996	Normal	1996	Normal	1996	Normal	1996	Normal	1996
Precipitação (mm)	120	94	137	215	150	114	151	109	153	136
Temperatura média (°C)	27	26	26	27	25	26	25	25	24	25
Temperatura máxima (°C)	30	28	31	30	29	31	28	29	27	29
Temperatura mínima (°C)	22	21	22	23	22	21	21	21	20	21
Radiação solar (MJm ⁻²)	-	524	-	574	-	589	-	601	-	587

* Normal climatológica para o período de 1952 - 1993.

O preparo do solo consistiu de aração em toda a área experimental. Foram coletadas amostras compostas de solo das três parcelas, para análises física, química e de fertilidade. As covas foram feitas com 20 cm de profundidade. A adubação à base de NPK, com formulação (4:14:8), foi de 38 g em fundação e 8 g em cobertura, no início do plantio e com 30 dias depois da emergência, respectivamente. A adubação foi incorporada manualmente, de acordo com as datas recomendadas para o cultivo do milho (EMBRAPA, 1993).

O plantio foi feito no dia 25 de março de 1996, utilizando o espaçamento de 1,0 m por 0,50 m, com quatro sementes por cova. O desbaste foi realizado 15 dias depois da emergência, para se obter uma densidade de 40.000 plantas/ha.

O controle contra o ataque de *Spodoptera fungiperda* (lagarto do cartucho) foi realizado com “Decis”, na dosagem de 0,7 litro por ha, por meio de pulverizador costal. Os tratos culturais foram realizados aos 15, 30 e 65 dias depois da emergência.

Na irrigação, utilizaram-se aspersores ZED - 30 Asbrasil, com intensidade de aplicação de 8,64 mm/h. A irrigação baseou-se no potencial matricial de água no solo, obtido por meio do Hidrosaver. Os teores de umidade foram coletados três vezes por semana. O solo foi mantido, durante todo o ciclo do milho, próximo da capacidade de campo.

2.2. Amostragem e determinações

Foram efetuadas coletas de cinco plantas por parcela, a cada cinco dias, durante os 30 primeiros dias depois da emergência. Após os 30 primeiros dias, as coletas foram realizadas com frequência de dez em dez dias, até o final do ciclo da cultura.

A cada amostragem era feita a medição da altura entre o nível do solo e a última inserção do caule. Em seguida, eram separadas as folhas, os caules e as raízes, para obtenção do peso verde (PV). A matéria seca total foi determinada, depois de secagem em estufa, a 75 °C, durante 72 horas. Determinaram-se, ainda, a área foliar, o índice de área foliar e a matéria seca das folhas, do caule e das raízes. A matéria seca total foi obtida através do somatório do peso de matéria seca de todas as partes da planta.

Durante o ciclo da cultura, foram efetuadas avaliações para caracterização dos estádios vegetativo, reprodutivo e de formação de grãos. Este ciclo foi dividido em 11 estádios distintos de desenvolvimento, de acordo com HANWAY (1963), apresentados no Quadro 1.

O dados meteorológicos foram coletados na Estação Meteorológica de Vitória de Santo Antão, PE, localizada próximo ao local do experimento. No período de 25 de março a 5 de julho de 1996, foram calculadas as médias diárias de temperatura e umidade relativa do ar, com base nas leituras do psicrômetro. Os valores diários da duração de brilho solar e da precipitação foram obtidos das leituras do heliógrafo e do pluviômetro, respectivamente.

Tendo em vista o uso de unidades térmicas na predição de datas de ocorrência dos estádios fenológicos da cultura do milho, os modeladores têm assumido que o conceito graus-dia é universalmente aplicável. Como salientaram VILLA NOVA et al. (1972) e MOTA (1975), a base teórica para essa técnica é a de que, dos processos envolvidos no desenvolvimento da cultura, todos são sensíveis à temperatura do ar. No entanto, o principal regulador da evolução dos estádios de desenvolvimento da cultura está condicionado a limites de temperaturas do ar, basal superior e inferior (T_b).

Os graus-dia (GD) foram calculados, a partir da emergência das plantas, usando-se a seguinte equação (VILLA NOVA et al., 1972):

$$GD = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} - T_b, \quad (1)$$

em que

T_{\max} = representa a temperatura máxima diária do ar ($^{\circ}\text{C}$);

T_{\min} = é a temperatura mínima diária do ar ($^{\circ}\text{C}$); e

T_b = designa a temperatura-base ($^{\circ}\text{C}$), que, para o milho, foi tomada como 10°C .

2.3. Elementos climáticos

Os três principais elementos climatológicos que afetam o rendimento das culturas são a radiação solar, a temperatura do ar e a precipitação pluvial. Os valores de precipitação, temperaturas do ar, máxima e mínima, e radiação solar diária, durante o período de 25 de março a 5 de julho de 1996, são ilustrados nas Figuras 2, 3 e 4, respectivamente.

A variabilidade da precipitação na região de Vitória de Santo Antão – PE, como em todo o Nordeste, exige irrigações durante o período de crescimento e desenvolvimento das culturas. A precipitação pluvial foi bastante irregular entre o período de 27 e 31 dias depois da emergência. Neste período as chuvas foram superiores a 100 mm, causando o tombamento de algumas plantas e o encharcamento do solo (Figura 2).

As temperaturas máxima, mínima e média do ar foram semelhantes às normais climatológicas de Vitória de Santo Antão – PE, no período considerado (Figura 3).

A radiação solar global durante o ciclo de desenvolvimento da cultura do milho é ilustrada na Figura 4.

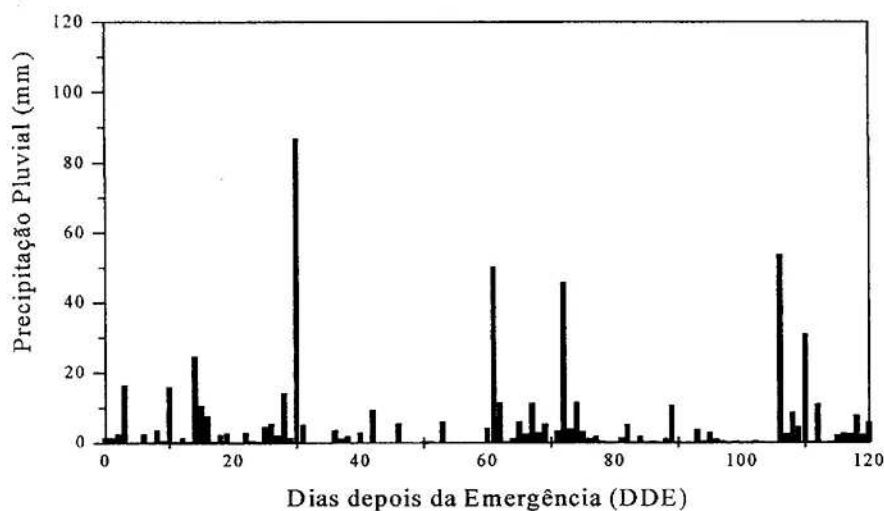


Figura 2 - Totais diários de precipitação (mm), em função dos números de dias depois da emergência (DDE).

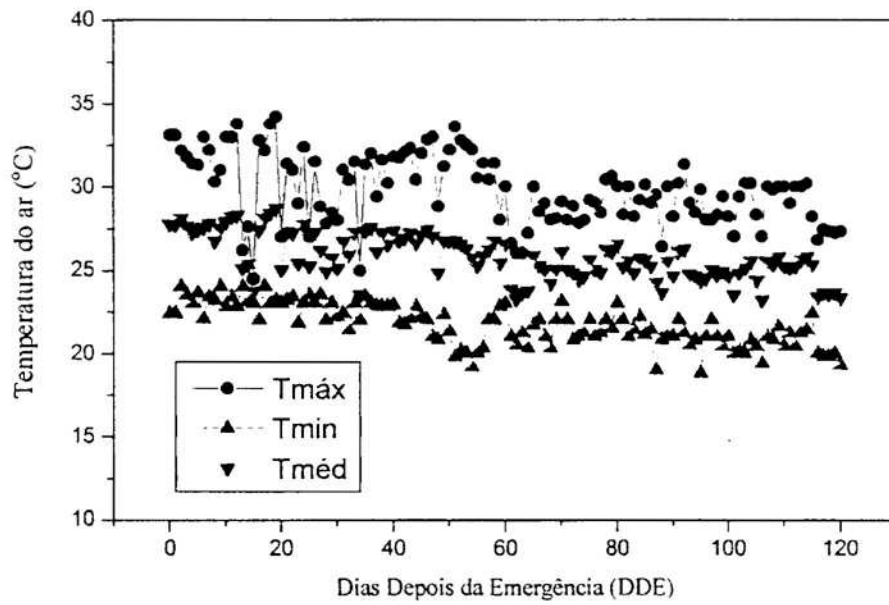


Figura 3 - Temperaturas (°C) máxima, mínima e média do ar, em função dos números de dias depois da emergência (DDE).

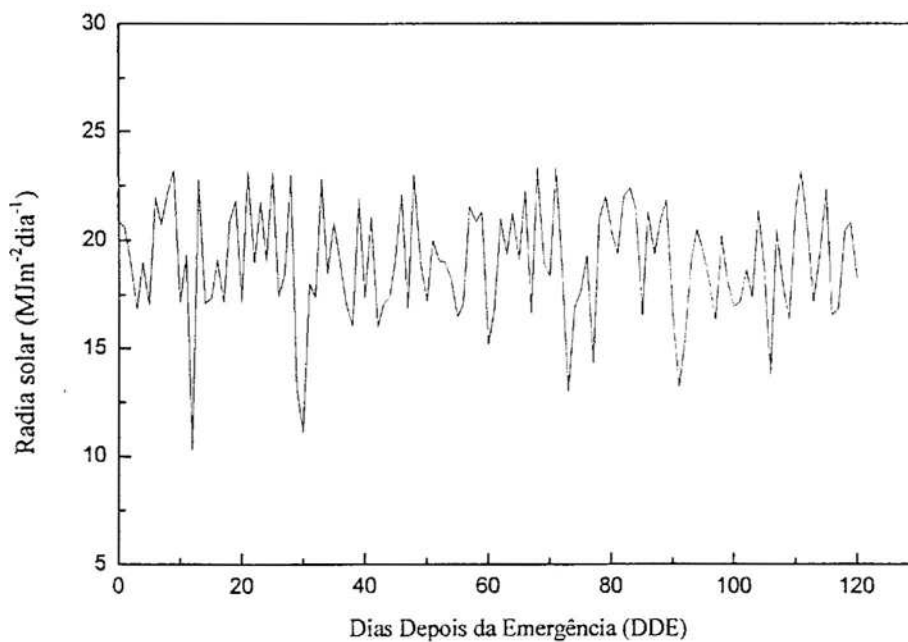


Figura 4 - Total diário de radiação solar global (MJm⁻²dia⁻¹), em função dos números de dias depois da emergência (DDE).

2.4. Resultados e discussões

2.4.1. Crescimento e desenvolvimento

A análise do desenvolvimento e crescimento da cultura, considerando as condições climáticas, é fundamental na previsão da produtividade da cultura. A época de ocorrência de cada estágio fenológico, conforme classificação de HANWAY (1963), em função dos números de dias (DDE) e dos graus-dia (GD) acumulados para o estabelecimento dos estádios fenológicos são, apresentados no Quadro 3.

Quadro3 - Época de ocorrência dos estádios fenológicos do cultivar de milho BR 3056, expressos em número de dias depois da emergência (DDE) e em graus-dia acumulados (GD) a partir da emergência

Estádio	DDE	GD
0	0	0
1	19	308
2	33	534
3	42	682
4	54	881
5	67	1090
6	79	1270
7	90	1483
8	101	1598
9	112	1761
10	120	1875

A duração do ciclo fenológico do cultivar BR 3056 foi de 120 dias. A quantidade de graus-dia acumulados, necessária à conclusão do ciclo, foi de 1875 GD.

HANWAY (1963), ao descrever e ilustrar os diferentes estádios de desenvolvimento da cultura do milho, afirmou que o período que vai do

florescimento ao ponto de maturação fisiológica parece ser relativamente constante em diferentes condições ambientais. Os resultados observados estão de acordo com os apresentados por SILVA (1995), LIMA (1995) e KEULEN e WOLF (1986).

No milho, a temperatura é a principal causa de variação anual em seus períodos de crescimento e desenvolvimento. GILMORE e ROGERS, (1958) e PLETT (1992) estabeleceram os graus-dia para prever a duração dos intervalos de desenvolvimento da cultura.

A colheita foi realizada aos 120 dias depois da emergência. A produção de grãos por unidade de área, ajustada ao grão com umidade de 15%, estimada a partir da colheita de uma área de 25 m² entre as três parcelas, foi de 4,1 toneladas por hectare.

As coletas foram feitas dentro das unidades experimentais (parcelas). As determinações foram realizadas ao acaso, totalizando 225 nas três parcelas. O tratamento foi distribuído nas três parcelas, onde houve distribuição homogênea de fertilizantes e água.

2.4.2. Matéria seca total

A Figura 5 ilustra a variação do peso seco total da parte aérea, das folhas, do caule, das raízes e dos órgãos reprodutivos da planta por unidade de área de terreno, em função dos dias depois da emergência (DDE).

A matéria seca total na cultura de milho apresentou três fases distintas: uma fase inicial, com acúmulo lento; uma de acumulação rápida, de 30 a 70 dias depois da emergência; e, finalmente, uma terceira, de 80 a 120 DDE, mantendo-se praticamente constante, observando um decréscimo no final, na matéria seca total. Os valores máximos de matéria seca da parte aérea ocorreram no período de 70 e 90 dias depois da emergência, com 1299,39 e 1332,59 g m⁻², respectivamente. Depois deste período, o acúmulo de matéria seca total começou a declinar progressivamente, até a maturidade fisiológica. Comportamento análogo foi verificado por LIMA (1995) e SILVA (1995).

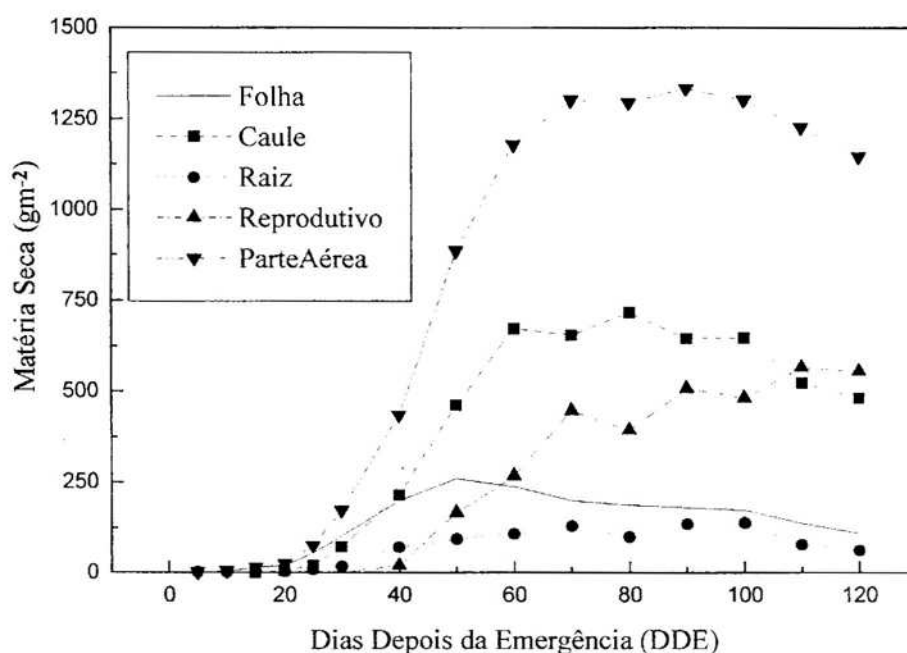


Figura 5 - Acúmulo de matéria seca total (gm^{-2}), em função do número de dias depois da emergência (DDE).

2.4.3. Matéria seca das folhas

Os valores máximos observados, referentes à matéria seca das folhas, foram atingidos no período vegetativo final da cultura, entre 50 e 60 dias depois da emergência, com totais de 258,5 e 238,3 gm^{-2} , respectivamente.

A partir dos 50 DDE, a matéria seca das folhas começou a diminuir lentamente. Aos 100 dias depois da emergência, observou-se diminuição mais acentuada no peso total, provavelmente em virtude da acentuada translocação de assimilados das folhas para os órgãos de reprodução da planta e da rápida senescência foliar.

Há evidências de que o aumento e o decréscimo de matéria seca no milho ocorrem de acordo com os graus-dia acumulados. Dessa forma, pode-se inferir que o alcance de valores superiores a 500 GD nos primeiros 33 dias favorece o

decréscimo do peso seco das folhas logo aos 50 dias depois da emergência (MAGALHÃES e SILVA, 1978).

Além disso, regiões áridas e semi-áridas, onde a temperatura média noturna é superior a 25°C, prejudicam o crescimento da cultura, porque os carboidratos acumulados durante a fotossíntese, no período diurno, são consumidos, em grande parte, devido à respiração noturna (EMBRAPA, 1994).

2.4.4. Matéria seca do caule

O acúmulo de matéria seca do caule foi lento até os 25 primeiros dias depois da emergência. Logo depois desse período, cresceu rapidamente, até atingir os valores máximos de 654,4 e 715,7 gm⁻² de peso seco total aos 70 e 80 DDE, respectivamente. Em seguida, passou a diminuir, até a maturidade fisiológica.

O colmo contém uma considerável reserva de fotoassimilados que podem ser translocados para os órgãos reprodutivos, condição verificada durante a senescência da planta (CANO, 1984). De fato, observou-se que a partir dos 80 DDE o caule inicia a perda de matéria seca, quando comparado com a matéria seca nos períodos anteriores. A redução do acúmulo de matéria seca caulinar, a partir dos 80 dias depois da emergência, ocorreu, provavelmente, porque os assimilados sofrem mobilização para as partes reprodutivas. Isto evidencia que o caule é um dreno preferencial numa posição hierárquica que sucede as folhas e precede os grãos.

A matéria seca do caule mantém-se por um período mais prolongado do que as folhas e as raízes. Isto indica a importância do caule na translocação de assimilados das outras partes da planta, para a formação dos grãos, assim como na manutenção estrutural da planta. Resultados semelhantes foram encontrados por LIMA (1995).

2.4.5. Matéria seca das raízes

As raízes representam um importante componente funcional e estrutural da planta. No entanto, pouco se sabe sobre o aspecto de suas características e variações no crescimento e desenvolvimento da cultura, assim como sobre suas atividades fisiológicas (MAGALHÃES e SILVA, 1978).

O acúmulo de matéria seca das raízes foi bastante regular, com pequenas variações no aumento e decréscimo de matéria seca ao longo do período de crescimento da cultura. Aos 40 dias depois da emergência houve acúmulo de peso seco mais rápido.

A partir dos 100 DDE, verificou-se diminuição no acúmulo de matéria seca das raízes. Esse comportamento prolongou-se até a maturação fisiológica da cultura.

2.4.6. Índice de área foliar

Na Figura 6 é ilustrada a variação do índice de área foliar (IAF), em função dos dias depois da emergência (DDE). O IAF máximo de $4,2 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ foi atingindo aos 60 DDE, no final do estágio final da polinização da cultura (reprodutivo), período em que acontece normalmente para cultivares de ciclo curto e, ou, médio, entre 60 e 70 DDE, caracterizando o final do ciclo vegetativo da cultura (MAGALHÃES e SILVA, 1978).

Verificaram-se três comportamentos distintos na variação do IAF. No período de 0 a 20, o crescimento foi lento; de 20 a 60, rápido; e de 80 a 120 DDE, observa-se diminuição da área foliar.

O início da queda do IAF, aos 80 DDE, é provavelmente devido à translocação de carboidratos das folhas para os órgãos reprodutivos e, ainda, ao fato de a senescência ser maior do que a emissão foliar.

Durante o período de 40 a 110 dias depois da emergência, o IAF ostentou valores em torno de três e quatro, indicando que a área foliar, em condições

favoráveis, mantém níveis satisfatórios para a interceptação da radiação solar, para o processo de fotossíntese.

O comportamento do IAF acompanha o crescimento da área foliar da cultura. Dessa forma, pode-se observar um comportamento semelhante: no início um crescimento lento; em seguida, um crescimento acelerado; e, no final, a diminuição devido à perda de área foliar da cultura.

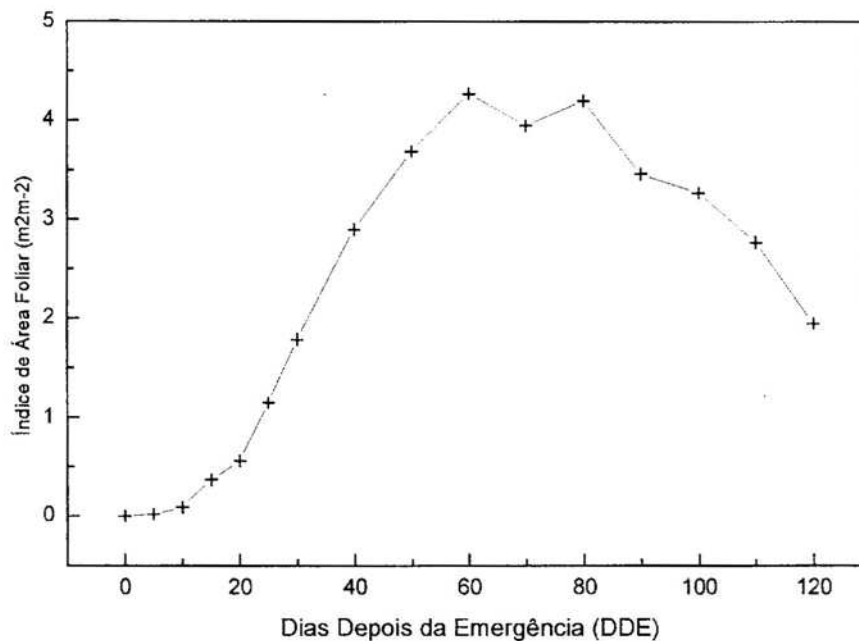


Figura 6 - Índice de área foliar, em função do número de dias depois da emergência (DDE).

2.4.7. Distribuição de matéria seca

Na Figura 7 podem-se observar os drenos preferenciais de distribuição de matéria seca, de acordo com o desenvolvimento da cultura. No início, os drenos preferenciais são as folhas e o caule, com percentagem maior para as folhas. Em seguida, o caule e os órgãos reprodutivos precedem a ordem de preferência. A distribuição de matéria seca para a parte aérea é em torno de 90 %, praticamente durante todo o período de crescimento da cultura.

Observa-se que o percentual de distribuição de matéria seca das folhas, com valores inferiores a 50%, só é verificado em torno de 40 dias depois da emergência (DDE), e vai diminuindo progressivamente até a maturidade fisiológica.

A formação dos órgãos reprodutivos (inflorescência masculina) verificou-se logo a partir dos 40 DDE, com percentagem inferior a 7%, aumentando progressivamente. Aos 60 dias depois da emergência inicia-se o processo de polinização e, conseqüentemente, o início do estágio reprodutivo da cultura. A partir dessa fase, a distribuição de matéria seca dá-se em ordem preferencial para o enchimento dos grãos.

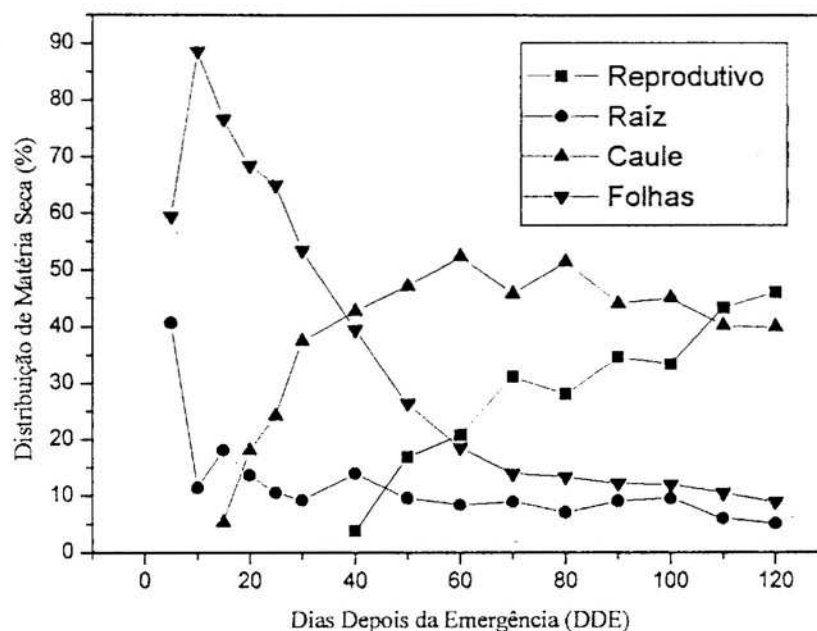


Figura 7 - Distribuição de matéria seca, em função do número dias depois da emergência (DDE).

2.4.8. Produtividade de grãos

A produtividade do cultivar de milho BR 3056 foi de 4,1 toneladas por hectare, obtida de uma área útil de 25 m². Nas parcelas 1, 2 e 3, a produtividade

foi de 3,9, 4,3 e 4,1 toneladas por hectare, respectivamente. Esta produtividade encontra-se de acordo com os dados obtidos experimentalmente para este cultivar, sob irrigação, na região do Araripe, no Estado de Pernambuco.

A produtividade final de grãos é fortemente influenciada pela área foliar da cultura. Observou-se que a área foliar do cultivar BR 3056 diminui depois do florescimento, fato que pode ser atribuído às elevadas temperaturas médias. As temperaturas elevadas e a transpiração excessiva nessa região contribuem para o decréscimo da produtividade da cultura. Na região semi-árida, mesmo em condições irrigadas, a produtividade é muito inferior à daquelas regiões onde as temperaturas e a transpiração são menos pronunciadas.

Observou-se, ainda, que como se trata de uma cultura de ciclo médio, a maturação fisiológica foi alcançada em torno de 120 dias depois da emergência, mostrando que, de certa forma, um pequeno período pode restringir o enchimento de grãos da cultura.

2.4.9. Conclusões

O crescimento e o desenvolvimento do cultivar de milho BR 3056 foram avaliados com base nos dados de acúmulo de matéria seca total, do acúmulo de matéria seca das folhas, do caule e das raízes, do índice de área foliar da cultura e da distribuição de matéria seca.

Os resultados indicam que a distribuição de matéria seca é bem caracterizada nos cultivares de milho com três fases distintas: uma fase de crescimento lento; outra, rápida; e, por fim, a diminuição, devido à senescência da cultura.

O experimento de campo descrito mostrou que a distribuição de carboidratos para os órgãos reprodutivos inicia-se aos 40 dias depois da emergência (DDE). Após o período de florescimento, observou-se que a distribuição de matéria seca passa preferencialmente para os órgãos reprodutivos, devido à diminuição do ritmo de crescimento das diversas partes da planta, como folhas, caule e raízes.

Os fatores ambientais e fisiológicos influenciam a produtividade final. Observa-se nessa região que as temperaturas médias são em torno de 25 e 26 °C, o que pode favorecer o aumento das taxas respiratórias de manutenção. Esses resultados, no entanto, são bem representativos para a região em estudo, quando se observa produtividade em torno de 2.500 kg ha^{-1} .

Os valores observados de distribuição de matéria de seca da parte área, compreendendo o caule, as folhas, os órgãos reprodutivos e as raízes, foram comparados com os resultados simulados pelo modelo e são apresentados no item 3.

3. DESENVOLVIMENTO DO MODELO

3.1. Métodos matemáticos de simulação

Os métodos matemáticos utilizados devem representar o sistema que se propõe modelar. As hipóteses assumidas levam em consideração a natureza das inter-relações do sistema a ser modelado. Neste trabalho, a planta, ou a comunidade de plantas, está condicionada apenas aos elementos climáticos radiação solar e temperatura do ar.

Como se trata de um modelo potencial de produtividade, o solo e outras variáveis que estão envolvidas no crescimento e no desenvolvimento da cultura não foram incorporados. No entanto, os principais mecanismos responsáveis pelo balanço de carbono, como fotossíntese e respiração, foram abordados.

De fato, o crescimento e o desenvolvimento da cultura dependem primeiramente da quantidade de açúcares disponíveis, que é a matéria-prima para a síntese de todos os compostos orgânicos da planta. Essa quantidade disponível é representada pelo açúcar produzido na fotossíntese e pelo seu consumo na respiração. Dessa forma, quantitativamente, esses processos fisiológicos se envolvem com mais intensidade na produção agrícola do que a absorção de outros minerais, que contribuem com apenas 10% do peso total da planta. O

acúmulo de matéria seca depende, portanto, em sua grande proporção, do balanço entre processos de fotossíntese e respiração (TAIZ e ZEIGER, 1991).

Vários fenômenos envolvidos no crescimento e desenvolvimento de culturas, como interceptação da radiação, fotossíntese, respiração, acumulação de matéria seca, índice de área foliar, entre outros, vêm sendo, ao longo dos anos, descritos matematicamente, o que possibilita a sua incorporação aos modelos (MONSI e SAEKI, 1953; THORNLEY, 1970, 1977; GOUDRIAN, 1977; PENNING De VRIES et al., 1974, 1989; KEULEN et al., 1986; JOHNSON, 1987; MONTEITH e UNSWORTH, 1990; THORNLEY e JOHNSON, 1990).

3.1.1. Fotossíntese

A fotossíntese consiste numa série de reações que resultam na produção de açúcares a partir do gás carbônico e da água, tendo como fonte de energia a radiação solar na faixa espectral visível. Esse processo físico-químico depende da densidade e do arranjo das folhas, que é representado pelo índice de área foliar - IAF, definido como a razão entre a superfície total da folhagem e a área do solo por ela recoberta. Esse parâmetro é utilizado para indicar a habilidade da folhagem em captar a radiação solar global incidente no dossel vegetativo (MONTEITH, 1981).

A equação que exprime a Lei de Beer (MONSI e SAEKI, 1953) fornece a interceptação e a atenuação da radiação por uma comunidade de plantas:

$$I = I_0 \exp(-kIAF) \quad (2)$$

em que I e I_0 ($Jm^{-2}d^{-1}$) representam, respectivamente, os fluxos de radiação solar global nos limites inferior e superior do dossel vegetativo; k é o coeficiente de extinção da radiação no mesmo dossel; e IAF designa o índice de área foliar.

A taxa fotossintética bruta P_g de uma folha, expressa como a quantidade de CO_2 produzida na unidade de área, por unidade de tempo, pode ser descrita por RABINOWITCH (1951):

$$P_g = \alpha I P_m / (\alpha I + P_m); \quad (3)$$

em que

P_g = fotossíntese bruta (kg J^{-1})

α = eficiência fotossintética (kg J^{-1}); e

P_m = fotossíntese bruta máxima ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

A fotossíntese máxima (P_m) é normalmente determinada em laboratório, para cada cultura sob temperatura e intensidade de radiação controladas. Um dos fatores ambientais que mais afetam a taxa fotossintética máxima é a temperatura. Dessa forma, usa-se a temperatura de referência a 20°C , ou seja, o valor P_{m20} a esta temperatura. O efeito da temperatura na taxa de fotossíntese máxima pode ser calculado da seguinte forma (KEULEN e WOLF, 1986; GOUDRIAN, 1977):

$$P_m = P_{m20} \cdot \psi \quad (4)$$

sendo

$$\psi = (T_{\text{med}} + T_r) / (T_r - T_b)$$

Na equação 4

P_{m20} = fotossíntese máxima a 20°C ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$);

T_r = temperatura de referência, fixada em 10°C ;

T_{med} = temperatura média do ar ($^\circ\text{C}$); e

T_b = temperatura-base da cultura ($^\circ\text{C}$)

Segundo a lei de Beer e Monsi e Saeki, FRANCE e THORNLEY (1984) propuseram uma equação exponencial de extinção da luz, em que se levam em consideração a orientação das folhas e sua transmissão de radiação:

$$I = \left(\frac{kI_0}{1 - \tau} \right) \exp(-kIAF) \quad (5)$$

em que

τ = coeficiente de transmissão da radiação através das folhas, que já leva em consideração a inclinação das mesmas (adimensional).

A integração da equação (3) nos níveis do IAF fornece a taxa fotossintética do dossel, P_c ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$), ou seja (FRANCE e THORNLEY, 1984):

$$P_c = \int_0^{IAF} P_g dz \quad (6)$$

$$P_c = \frac{P_m}{k} \ln \left[\frac{\alpha k I_0 + (1 - \tau) P_m}{\alpha k I_0 \exp(-k IAF) + (1 - \tau) P_m} \right] \quad (7)$$

Da equação 6 obtém-se a taxa diária de fotossíntese no dossel vegetativo (P_d), por meio da seguinte equação:

$$P_d = \int_0^h P_c dt \quad (8)$$

em que

h = duração do dia (expressa em segundos). Neste modelo, em primeira aproximação, $h = 86400$. Dessa forma, a fotossíntese bruta diária (P_d) pode ser obtida integrando-se a expressão (7):

$$P_d = \frac{\frac{P_m h}{k} \ln \left[\left(\Omega + \beta + (2\Omega\beta + \beta^2)^{1/2} \right) \right]}{\left[\Omega \exp^{-k IAF} + \beta + (2\Omega\beta \exp^{-k IAF} + \beta^2)^{1/2} \right]} \quad (9)$$

em que

$$\Omega = \alpha k / h; e \quad (10)$$

$$\beta = (1 - \tau) P_m \quad (11)$$

3.1.2 Respiração, crescimento e manutenção da cultura

A maioria dos modelos de simulação usa, para a equação 8, o período de integração de um dia, assumindo que o carboidrato produzido durante esse intervalo é usado para os processos de respiração, síntese de novos materiais e armazenamento.

O termo respiração tem sido empregado como a perda de CO₂ ou de matéria seca pela planta. No entanto, a respiração é o processo pelo qual compostos altamente energéticos são sintetizados a partir dos carboidratos produzidos na fotossíntese. Assim, a respiração pode ser dividida, teoricamente, em respiração de crescimento e de manutenção. As substâncias são utilizadas para formação de novas estruturas da planta e sua manutenção estrutural. A respiração de crescimento é definida como a produção de novos compostos orgânicos, enquanto a de manutenção consiste na simples relocação de outros compostos existentes e está relacionada com o consumo de energia para promover a organização estrutural da planta (McCREE, 1974).

A quantificação dos principais componentes da biomassa permite estimativas da quantidade de glicose necessária para formar um grama de material vegetal e da eficiência do processo construtivo da respiração (PENNING De VRIES, 1975; PENNING De VRIES et al., 1979).

Nos modelos desenvolvidos para simular o desenvolvimento de plantas, a respiração de crescimento é normalmente tratada como a energia necessária para síntese de compostos (ligninas, proteínas, ácidos orgânicos, carboidratos, etc.), para formação de diversas partes da planta, como folha, colmo, grãos e raízes (PENNING De VRIES et al., 1989). Dessa forma, a eficiência de conversão de compostos em matéria seca é determinada em laboratório. Para cada parte estrutural da planta é atribuído um valor de eficiência de conversão.

A respiração de manutenção e a fotossíntese têm sido muito estudadas durante os dois últimos séculos. Contudo, os mecanismos envolvidos na manutenção da estrutura vegetal ainda são pouco conhecidos (STEWART e BIDWELL, 1983). É bastante complexo quantificar o processo de respiração de manutenção, devido às constantes interações a que a planta está submetida. O constante estresse ambiental pode mascarar os resultados obtidos em laboratório, os quais a quantificam entre 15 e 30% de perdas de fotoassimilados (PENNING De VRIES et al., 1989).

De todos os fatores ambientais, o que mais afeta a respiração de manutenção é a temperatura. Para cada aumento de 10 °C, o valor da taxa de

respiração de manutenção duplica (McCREE, 1974). A dependência da taxa de respiração de manutenção com a temperatura corresponde ao conceito biológico de Q_{10} . Em modelagem, a respiração de manutenção é normalmente estimada levando-se em conta o efeito da temperatura:

$$R_m = R_{mr} \psi \quad (12)$$

em que

R_m = taxa de respiração máxima ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$); e

R_{mr} = taxa de respiração de referência ($^{\circ}\text{C}$), fixada em 20°C .

A respiração é tratada individualmente para cada parte da planta: folhas, caule, raízes e órgãos de armazenamento. Assim, o valor do parâmetro R_{mr} pode variar para as diferentes partes da planta. Neste trabalho, os componentes estruturais da planta têm dados diferenciais de respiração de manutenção e de crescimento.

3.1.3. Desenvolvimento fenológico da cultura

A distinção entre o crescimento e o desenvolvimento é fundamental para considerar os fatores ambientais durante o ciclo vegetativo de uma cultura. Por crescimento entende-se o aumento em peso e em volume dos órgãos estruturais da planta, como folhas, caules, raízes e órgãos de armazenamento. O desenvolvimento é definido como a passagem das fases fenológicas da cultura, sendo caracterizado pelo surgimento de órgãos vegetativos e reprodutivos.

Os estádios de desenvolvimento da cultura podem ser antecipados ou retardados, em função de condições ambientais. A emergência, a iniciação floral, o florescimento e a formação de grãos do milho, por exemplo, são fortemente influenciados pela temperatura e pelo fotoperíodo (KEULEN e WOLF, 1986; SALISBURY, 1992; TAIZ e ZEIGER, 1991).

Normalmente o desenvolvimento da cultura, nos modelos de simulação, é expresso através de uma escala que varia de 0 a 2. Nesta escala, 0 é a emergência, 1 a antese e 2 a maturidade fisiológica da planta. Para estabelecer

cada estágio fenológico, é comumente usado o conceito de graus-dia (GD). Assim, o desenvolvimento (D) é definido como a razão entre os graus-dia acumulados e o número total de graus-dia (GTF) que a planta precisa para alcançar o florescimento:

$$D = GD / GTF \quad (13)$$

Do florescimento até a maturação, são subtraídos da equação D os graus-dia acumulados até o florescimento:

$$D = GD - GTF / GDT + GTF \quad (14)$$

em que

GDT = graus-dia acumulados até a maturidade fisiológica.

Esse conceito baseia-se em observações segundo as quais a temperatura é o principal fator que influencia os estágios de desenvolvimento da planta (VILLA NOVA et al., 1972).

3.1.4. Partição de fotoassimilados

A partição de fotoassimilados na planta é requisito essencial para que haja crescimento harmônico entre as diversas partes. A distribuição de fotoassimilados é um processo pelo qual os compostos disponíveis para o crescimento são alocados para a formação de folhas, caule e raízes e nos órgãos de armazenamento.

O crescimento e o desenvolvimento não podem ser confundidos com a distribuição de matéria seca nos órgãos da planta. O modelo de distribuição deve ser uma função que depende da idade fisiológica do espécime e de fatores ambientais, como temperatura do ar e do solo, radiação, disponibilidade edáfica de água e nutrientes, etc. No entanto, devido à pouca informação quantitativa sobre o controle interno de distribuição de carboidratos pela planta, a maioria dos modelos de simulação admite que a distribuição, nos diferentes estágios de

desenvolvimento, é feita sem considerar os diversos fatores ambientais (PENNING De VRIES et al., 1989). Essa aproximação tem sido adotada em experimentos com várias culturas e utilizada em diversos modelos (KEULEN et al., 1982; HEEMST, 1986; GOUDRIAN e LAAR, 1994). Para contorná-la, costuma-se utilizar o já mencionado conceito de graus-dia, que, pelo menos, leva em conta o efeito da temperatura no desenvolvimento.

Nos modelos de simulação de plantas, durante todo o desenvolvimento vegetativo, o carboidrato disponível é alocado através do balanço parte aérea — raízes. Nesse período, a parte aérea corresponde de 80 a 90% da planta e as raízes de 10 a 20%. Na fase reprodutiva, todo carboidrato é alocado para a parte aérea. A distribuição de carboidratos para a folha e o caule diminui progressivamente até a maturação fisiológica, devido ao aumento progressivo de alocação de todo o carboidrato para os órgãos de armazenamento (THORNLEY e JOHNSON, 1990).

3.1.5. Índice de área foliar

O índice de área foliar (IAF) e a taxa com que são formadas as folhas do início ao final do crescimento são importantes para o processo fotossintético e, conseqüentemente, para o rendimento final da cultura. Mais de 80% da radiação solar global na faixa espectral do visível é interceptada quando o IAF alcança de 3 a 5, situação que se convencionou chamar de dossel fechado (MONTEITH, 1965).

Grande parte dos modelos de simulação calcula o índice de área foliar através do quociente entre o peso seco e o peso específico da folhagem, ambos determinados experimentalmente. A grande dificuldade encontrada na aplicação desse método reside, exatamente, na falta de precisão das medidas em campo (PENNING De VRIES et al., 1989). Em alguns modelos (KEULEN et al., 1982), assume-se uma hipótese ainda mais restritiva: a de que o peso específico da folhagem mantém-se constante. As diferentes condições ambientais, às quais

estão submetidas as culturas, causam diferenças no peso específico das folhas (PENNING De VRIES et al., 1989). Assim, em que pesem as dificuldades apontadas na mensuração dos pesos seco e específico da folhagem, esse foi o método usado neste trabalho para estimativa de IAF.

PENNING De VRIES et al. (1989) afirmam que, em muitos modelos, o cálculo do IAF não é realista, devido à grande complexidade na simulação da interação “ peso da folha - área foliar - fotossíntese - crescimento - peso da folha”.

3.1.6. Senescência

A senescência refere-se à perda da capacidade dos processos fisiológicos e de biomassa, principalmente na folhagem. Os processos fisiológicos envolvidos na senescência são difíceis de serem medidos experimentalmente. Dentre esses processos, destacam-se a desnutrição protéica, a quebra de enzimas e a grande quantidade de hormônios que são produzidos para indução da senescência.

Resultados experimentais mostram que ocorre uma perda da área foliar de 40 a 75% no momento da maturação fisiológica. Nesse intervalo, a magnitude da perda depende da situação específica considerada (KEULEN et al., 1982; GOUDRIAN, 1977; PENNING De VRIES et al., 1989).

As aproximações mais realísticas assumem que, a partir de uma certa idade da cultura, as folhas, o caule e as raízes sofrem uma degradação constante. As folhas, no período da senescência, perdem peso antes da sua completa degradação. Isto indica que houve remobilização parcial de fotoassimilados para os órgãos de armazenamento.

Quando a biomassa das folhas diminui, a fotossíntese decresce. A degradação da cultura inicia-se quando a taxa fotossintética é menor do que a taxa de respiração. Dessa forma, a degradação das folhas, do caule e das raízes é considerada constante a partir do momento em que esse processo se inicia.

3.1.7. Acúmulo de matéria seca

O acúmulo de matéria seca, ao longo do tempo, é descrito por PENNING De VRIES (1975) da seguinte forma:

$$\frac{dW}{dt} = (Pd - RmW)Eg \quad (15)$$

em que

dW/dt = variação de matéria seca ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$); e

Eg = respiração de crescimento, isto é, eficiência de conversão de carboidratos em matéria seca ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

A matéria seca é definida como o somatório do peso seco dos componentes da planta. A variação temporal do peso seco foi comentada anteriormente neste trabalho.

A estimativa da matéria seca, nesse modelo, é feita calculando-se, inicialmente, o balanço de carbono para estabelecimento do ganho e da perda, representados pela fotossíntese bruta diária e respiração de manutenção, respectivamente. Em seguida, o ganho de carbono simulado é convertido em matéria seca, através da respiração de crescimento, aqui denominada eficiência de conversão de carboidratos (Eg).

3.2. Descrição do modelo

A elaboração do modelo de simulação de crescimento, desenvolvimento e produtividade da cultura do milho (*Zea mays* L.) foi efetuada em duas etapas:

- a) pesquisa bibliográfica de modelos matemáticos capazes de simular as principais interações entre os processos fisiológicos e o ambiente, no que concerne à cultura do milho; e
- b) confecção do modelo propriamente dito através do *software Modelmaker Versão 2.0*.

Os processos fisiológicos considerados foram aqueles inerentes ao crescimento e ao desenvolvimento, particularmente a fotossíntese máxima; a

partição de fotoassimilados, condicionados pelo estágio de desenvolvimento da cultura; a eficiência de conversão de carboidratos em matéria seca para folhas, colmo, raízes e grãos; e a respiração de crescimento e de manutenção.

O modelo constou de quatro partes principais. Na primeira, computou-se o ganho de carbono diário do sistema por meio da fotossíntese. Na segunda, foram computadas as perdas de carbono pelo sistema, representadas pela respiração de crescimento e manutenção. Uma vez conhecido o balanço de carbono entre ganhos e perdas, na terceira parte computou-se a distribuição de carboidratos para as folhas, o colmo, as raízes e os órgãos de armazenamento, de acordo com o estágio de desenvolvimento da cultura. Finalmente, na quarta parte foi simulado o incremento diário da matéria seca total, através do somatório de todas as partes estruturais da planta (Figura 8).

3.2.1 Ajustes do modelo

A simulação foi feita para um intervalo de predição de 120 dias. Os dados meteorológicos utilizados foram obtidos na Estação Experimental de Vitória de Santo Antão – PE. A temperatura basal foi de 10 °C, de conformidade com a caracterização de cultivares utilizadas pela EMPRESA... – EMBRAPA (1993) e por GOMES e CARNEIRO (1993).

Os cálculos de partição de carboidrato foram feitos de acordo com o modelo de distribuição de PENNING De VRIES et al. (1989) e KEULEN e WOLF (1986), para a cultura do milho. Foram ainda utilizadas as interpolações necessárias para levar em conta os distintos estágios de desenvolvimento da cultura e na partição de fotoassimilados para raiz, folha, caule e órgãos reprodutivos.

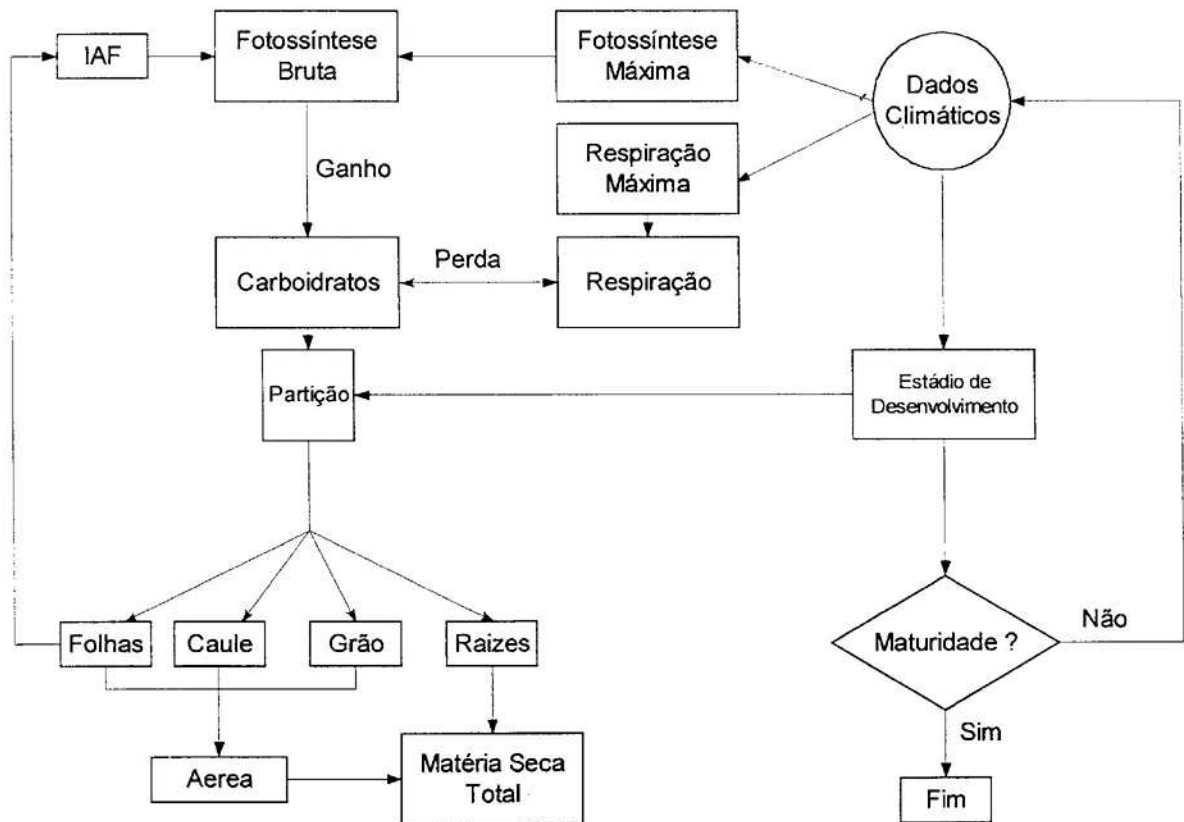


Figura 8 - Diagrama esquemático do modelo de crescimento, desenvolvimento e produtividade da cultura do milho. Os retângulos representam a quantidade e taxa; os círculos, os dados de entrada; os quadrados, as variáveis auxiliares; o triângulo, uma decisão; e as linhas, os fluxos de informações.

4. TESTE E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MODELO

4.1. Teste do modelo

4.1.1. Introdução

A distribuição de matéria seca, assim como da produtividade, é fortemente influenciada pelos dados climáticos e fatores ambientais. A análise de sensibilidade dos parâmetros e as variáveis utilizadas no modelo podem ser pesquisadas através das variações do seu comportamento diante das alterações de seus respectivos valores.

A otimização é o processo em que o valor do parâmetro utilizado no modelo é ajustado para obter o melhor ajustamento entre os dados observados e simulados.

Os testes dos modelos são realizados com o objetivo de comparar as predições com os dados observados em campo e, dessa forma, inferir quais os fatores que mais contribuem para o comportamento do modelo. Esses procedimentos visam pesquisar as causas e conseqüências das variações entre dados observados e simulados (COMERMA et al., 1985).

4.1.2. Metodologia

Os testes entre dados observados e simulados consistiram em comparar o comportamento do modelo, para verificar sua consistência quanto a crescimento, desenvolvimento e produtividade da cultura.

Na análise de sensibilidade, variou-se um parâmetro, com os demais mantidos constantes, a fim de detectar o seu efeito na eficácia do modelo.

A análise foi realizada com os parâmetros de inicialização. Em cada teste, verificou-se o comportamento da matéria seca da parte aérea, das raízes, do caule, das folhas, da produtividade em grãos, do índice de área foliar e da área específica das folhas.

A variável radiação solar e os parâmetros utilizados na análise de sensibilidade foram: α (declinação da curva de fotossíntese em resposta à radiação para o milho), respiração e fotossíntese máxima a 20°C, m (coeficiente de transmissão da radiação no dossel vegetativo), k (coeficiente de extinção da radiação), t_b (temperatura-base) e Q_{10} (taxa de reação química).

A otimização foi realizada para verificar quais valores são mais indicados para a utilização das estimativas dos parâmetros atribuídas ao modelo.

4.2. Resultados e discussões

4.2.1. Acúmulo de matéria seca - parte aérea observada e simulada

Na Figura 9 são apresentados os resultados simulados e observados de matéria seca total da parte aérea, em função dos dias depois da emergência (DDE).

Observa-se um bom ajustamento dos dados simulados pelo modelo aos valores observados até os 25 dias depois da emergência. Esse período compreende a fase lenta e o início da fase de rápida acumulação de matéria seca. Os máximos valores de matéria seca para parte aérea observada e simulada foram de 1332,5 e 1335,1 gm^{-2} , respectivamente, aos 90 dias depois da emergência.

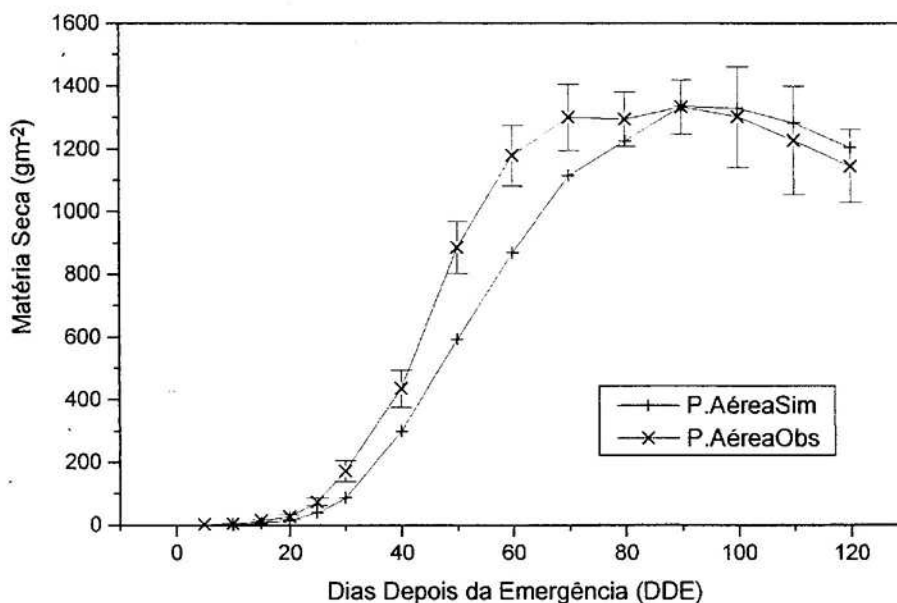


Figura 9 - Matéria seca total para parte aérea do milho BR 3056, observada e calculada.

No período de 30 a 80 DDE, o modelo subestimou os valores observados para parte aérea. Após este período, o modelo tende a se ajustar aos dados observados. Observa-se ainda que, no final do ciclo da cultura, os desvios-padrão ficam mais próximos dos dados observados em campo.

A grande complexidade dos modelos de distribuição de carboidratos, normalmente, é com relação aos órgãos reprodutivos. Até o final do crescimento vegetativo os carboidratos são distribuídos para o caule, as folhas e as raízes (THORNLEY, 1977; KEULEN et al., 1982; KEULEN e WOLF, 1986; PENNING De VRIES et al., 1989; CHAN, 1992; GOUDRIAN e LAAR, 1994). No entanto, observou-se nos resultados experimentais de campo que, no final do ciclo vegetativo, grande parte de fotoassimilados já tinha sido translocada para a formação das inflorescências masculina e feminina do milho (EMBRAPA, 1993; MELGES, 1994).

Essa distribuição, afeta os resultados simulados com os outros componentes da matéria seca total, como raízes, folhas e caule, em que se verifica menor ajustamento entre dados simulados e observados.

Em geral, o modelo é capaz de estimar o comportamento médio das variações existentes ao longo do crescimento e desenvolvimento da cultura. No entanto, apesar das variações de matéria seca, os resultados simulados mostram a consistência do modelo no que se refere ao comportamento verificado no início da fase vegetativa, com crescimento lento no período de acumulação rápida de matéria seca e, principalmente, na maturação fisiológica, quando os dados se ajustam de maneira semelhante aos observados em campo.

4.2.2. Acúmulo de matéria seca das folhas observada e simulada

O comportamento dos dados simulados e observados de distribuição de matéria seca das folhas, em função dos dias depois da emergência, é mostrado na Figura 10. Do início do crescimento até os 50 primeiros dias, observa-se que o modelo não se ajustou aos dados observados. Os valores máximos de matéria seca das folhas, observados e simulados, foram de 285,5 e 236,1 gm^{-2} , aos 50 e 60 DDE, respectivamente. Observou-se, entretanto, durante o período de 60 a 110 DDE, maior ajustamento do modelo aos dados observados. Este período corresponde ao início de formação de grãos e ao da senescência foliar. Esses dois processos são descritos na maioria dos modelos de simulação de plantas (THORNLEY, 1977; HUNT, 1982; MACHADO, 1981; KEULEN e WOLF, 1986; PENNING De VRIES et al., 1989; GOUDRIAN e LAAR, 1994).

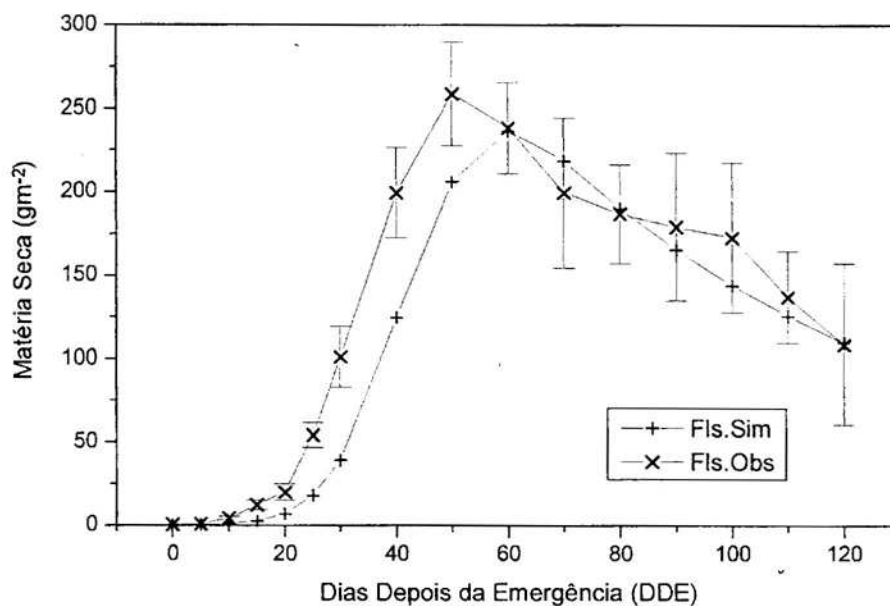


Figura 10 - Matéria seca total das folhas do milho BR 3056, observada e calculada.

No final do crescimento, a curva referente aos dados simulados tende a se comportar de maneira a se ajustar aos dados observados. Os dados simulados e os observados ajustam-se melhor no início e no final do crescimento da cultura.

O modelo foi capaz de estimar a senescência foliar, exatamente no início da formação dos grãos e tendo as folhas como dreno preferencial até o final do estágio vegetativo. Esse comportamento pode ser verificado através dos dados observados e simulados, e o decréscimo de matéria seca começa logo no início do estágio reprodutivo da cultura (60 DDE).

4.2.3. Acúmulo de matéria seca do caule observada e simulada

Na Figura 11 são apresentados os resultados simulados e observados de matéria seca total do caule, em função dos dias depois da emergência (DDE). Observa-se bom ajustamento do modelo aos dados observados, referentes ao

caule. Apenas no período depois da fase reprodutiva o modelo tende a superestimar os valores observados. No entanto, após este período, o comportamento da curva tende a se ajustar novamente aos dados observados. Os maiores valores observados e simulados foram de 715,7 e 871,2 gm^{-2} , aos 80 e 70 DDE, respectivamente.

Aos 70 DDE observa-se que os dados simulados pelo modelo mudam bruscamente, diminuindo até o final do crescimento da cultura. Esse fato é devido à distribuição de carboidratos assumidos pelo modelo para a cultura do milho. A partir desse período não se considera partição de carboidratos para a parte caulinar. Dessa forma, o saldo de carbono para caule, folhas e raízes é sempre negativo, devido ao fato de a partição de fotoassimilados se encerrar nessa fase.

Os dados referentes à partição de fotoassimilados para o caule estabelece que os drenos preferenciais de carboidratos após 60 dias depois da emergência são os órgãos de armazenamento (TAIZ e ZEIGER, 1991; SALISBURY, 1992). A variação dos fatores ambientais, principalmente com relação à temperatura, que influencia a distribuição de carboidratos na planta, é estabelecida de acordo com os estádios de desenvolvimento da cultura, que é condicionado pelo somatório de graus-dia.

Os dados referentes aos estádios fenológicos da cultura, descritos na literatura, revelam que a maioria dos cultivares precisa de pelos menos 800 a 900 graus-dia para o início do estágio reprodutivo da cultura (BOONS-PRINS et al., 1993). No entanto, observou-se que o estágio reprodutivo do cultivar BR 3056 utilizado neste trabalho, de acordo com HANWAY (1963), o final do estágio reprodutivo, que tem início com o pólen abrigado, só foi alcançado com 1.090 graus-dia.

De fato, os melhores ajustes de matéria seca caulinar são observados no início e no final da maturidade fisiológica, que evidencia a dificuldade com relação à partição de fotoassimilados na fase reprodutiva da cultura.

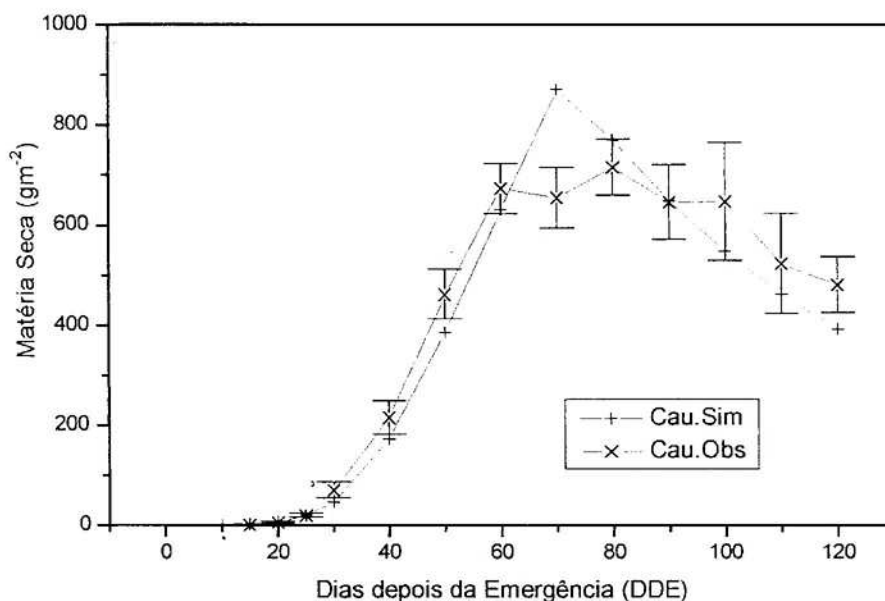


Figura 11 - Matéria seca total do caule do milho BR 3056, observada e calculada.

4.2.4 Acúmulo de matéria seca das raízes observada e simulada

Os dados simulados e observados de distribuição de matéria seca total das raízes, em função dos dias depois da emergência (DDE), são ilustrados na Figura 12. O grau de dificuldade para extração e medição das raízes pode ter comprometido as análises referentes à distribuição de matéria seca para as raízes, como pode ser observado através da magnitude dos valores de desvios-padrão.

Verifica-se que os dados observados e simulados durante o período compreendido de 0 a 30 dias depois da emergência ajustaram-se aos dados observados. Aos 100 e 80 DDE os valores máximos observados e simulados foram de 142,0 e 134,7 gm⁻², respectivamente.

No início e final do crescimento da cultura, os dados observados e simulados tendem a se ajustar melhor. Esse comportamento é verificado em toda a distribuição de matéria seca para as diversas partes da planta. Na fase de crescimento exponencial da cultura, as variações são mais intensas e os processos físicos e biológicos são mais complexos de serem estimados (HUNT, 1981).

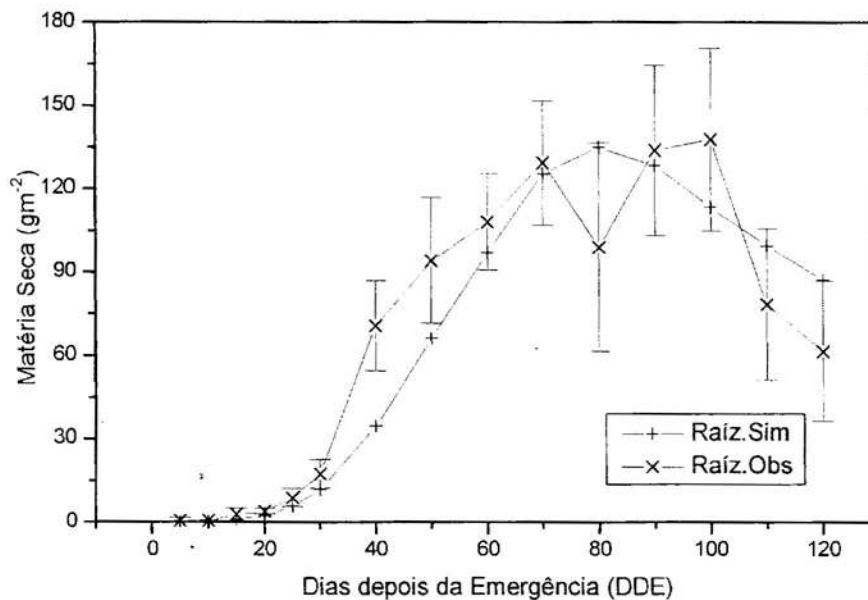


Figura 12 - Matéria seca total das raízes do milho BR 3056, observada e simulada.

4.2.5. Índice de área foliar observado e simulado

Na Figura 13 são apresentados os resultados simulados e observados do índice de área foliar (IAF), em função dos dias depois da emergência (DDE). O índice de área foliar calculado superestima e subestima os valores observados em campo, dependendo do estágio. No início do crescimento da cultura o IAF calculado é lento, alcançando valores em torno de 1,0 aos 30, e o observado aos 25 DDE.

No período compreendido entre 15 e 50 DDE os valores simulados são subestimados pelo modelo. Esse intervalo corresponde ao início do crescimento exponencial, até o término da fase vegetativa da cultura. Após esse período, os valores simulados tendem a superestimar os valores observados. Verifica-se, no entanto, que a queda do IAF simulado inicia-se semelhante ao observado e ainda

que, no final do ciclo da cultura, o IAF simulado tende a ficar bem próximo do valor observado.

Os valores de IAF máximo observado e simulado foram de 4,2 e 4,4, respectivamente, ambos aos 60 DDE.

O milho, por se tratar de uma planta C4, é altamente eficiente no uso da radiação interceptada. A saturação fotossintética do milho dificilmente acontece, pois os fatores limitantes mais observados da produção são a disponibilidade de água, o solo e a nutrição mineral da planta (SALISBURY, 1992).

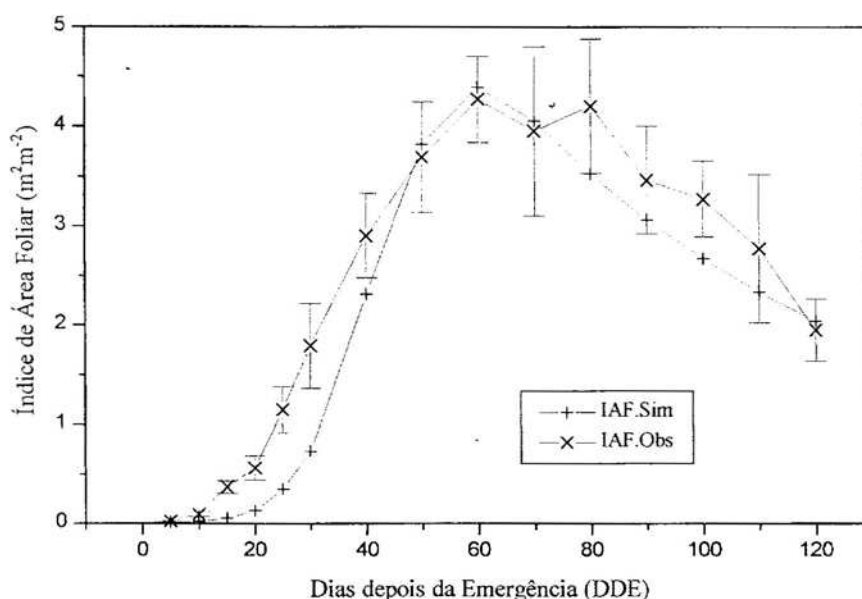


Figura 13 - Índice de área foliar do cultivar de milho BR 3056, observado e simulado.

Pode-se verificar que, a partir dos 50 DDE, os valores de IAF são superiores a 3 e se mantêm até os 90 DDE, o que indica que a cultura está com o dossel vegetativo bastante desenvolvido, interceptando teoricamente a radiação nele incidente.

A matéria seca das folhas é fundamental no cálculo de índice de área foliar realizado pelo modelo. PENNING De VRIES et al. (1989) afirmam que os dados

na literatura são insuficientes para uma aproximação mais realística para o cálculo do IAF.

A maioria das funções descritivas dos modelos para o cálculo do IAF são aproximações que não levam em conta fatores ambientais e morfológicos da cultura. SIBMA (1987), citado por PENNING De VRIES et al. (1989), verificou que a espessura da camada de folhas depende dos fatores ambientais e climáticos, como radiação, temperatura e estresse hídrico da cultura, e ainda que a densidade de plantas e o nível de fertilização afetam os valores de peso das folhas e, conseqüentemente, a área foliar específica. Essa constatação interfere nas aproximações de área foliar específica e no peso específico das folhas, que são variáveis responsáveis pelo cálculo do IAF.

Apesar de a área foliar ter sido melhor ajustada, o IAF não se comportou de maneira semelhante. Esses resultados indicam que os dados atribuídos para simulação do IAF, para área foliar específica e mesmo para peso específico das folhas, ainda são de qualidade duvidosa.

4.2.6 Área foliar específica

Os resultados observados e simulados para área foliar específica, em função dos dias depois da emergência (DDE), são apresentados na Figura 14. Os dados referentes à área foliar específica estão de acordo com os dados obtidos de experimentos com a cultura do milho (KEULEN e WOLF, 1986; BOONS-PRINS et al., 1993; PENNING De VRIES et al., 1989; GOUDRIAN e LAAR, 1994).

Dessa forma, o índice de área foliar do modelo é calculado de acordo com a área específica das folhas, ou o seu inverso, através do peso específico da folhagem.

Observa-se que o comportamento da área específica da cultura, durante os 25 primeiros dias depois da emergência, é muito superior à média assumida pelo modelo. Esses valores, em geral, são uma representação de várias regiões e de

diversos cultivares de milho. No entanto, pode-se verificar que o modelo aproxima-se, em alguns períodos, dos valores observados médios experimentais.

Diversos autores, como SIBMA (1977), PENNING De VRIES et al. (1989), KEULEN et al. (1989) e GOUDRIAN e LAAR (1994), afirmam que a área foliar depende, entre outros, da morfologia e da fisiologia da cultura.

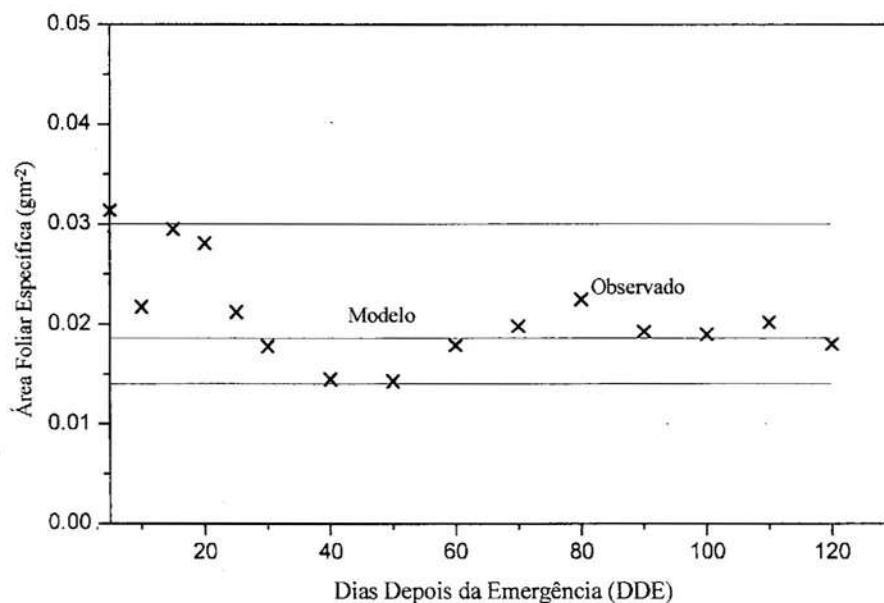


Figura 14 - Área foliar específica do cultivar de milho BR 3056, observada e atribuída pelo modelo.

4.2.7 Produtividade de grãos observada e simulada

Na Figura 15 pode-se observar a distribuição de matéria seca para os órgãos reprodutivos, compreendendo a palha, o grão e as espigas. Verifica-se nesta figura que a partição de fotoassimilados para os órgãos reprodutivos, observados em campo, tem início em torno de 40 dias depois da emergência. No entanto, a matéria seca para os órgãos reprodutivos simulados pelo modelo só tem início após o término da fase vegetativa da cultura, em torno de 65 DDE.

A produtividade de grãos observada e simulada foi de $4.100 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ e $4.569 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, respectivamente. Esta produtividade é considerada muito baixa, quando comparada com as regiões Sul e Sudeste do País. No entanto, a produtividade média da região Nordeste é de aproximadamente 700 a $1.000 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (IBGE, 1992). Esses valores são considerados satisfatórios para o cultivar BR 3056, sob regime irrigado, na região da Zona da Mata de Pernambuco.

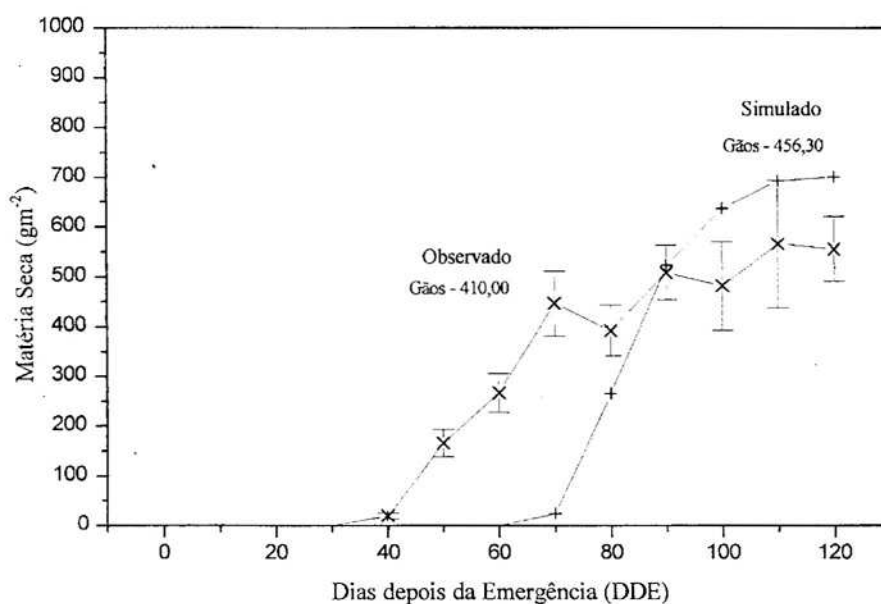


Figura 15- Distribuição de matéria seca dos órgãos reprodutivos observada e simulada (palha, grão e espiga) do cultivar de milho BR 3056.

Há de se considerar ainda que, se por um lado há dados insuficientes de respiração para folhas, caule e raízes, por outro são praticamente inexistentes dados referentes ao estudo da respiração dos órgãos reprodutivos do milho. Valores de $0,015$ a $0,030 \text{ KgCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ são utilizados para o cálculo de respiração de manutenção da cultura (BOONS-PRINS et al., 1993; PENNING De VRIES et al., 1989; GOUDRIAN, 1992), que de certa forma permite um enorme intervalo na variação da produtividade de grãos. Esta variação de fato existe de região para região; no entanto, não se conhecem, para cada material genético dos cultivares mais semeados, as informações necessárias, que permitam modelar de forma mais

realística, no que se refere à variação de perdas relativas à respiração e ao ganho de carbono representado pela fotossíntese. PENNING De VRIES et al. (1989) refere-se à respiração de manutenção como um dos processos fisiológicos mais complexos de estimativas.

4.2.8 Análise de consistência do modelo

De modo geral, o modelo representou relativamente bem as pressuposições e as hipóteses físicas e biológicas assumidas. Observou-se que as equações representaram o crescimento, o desenvolvimento da cultura e a produtividade potencial de grãos para a região em estudo, quando comparados com os dados observados experimentalmente.

O modelo tem um grande potencial no que se refere à predição da distribuição da matéria seca e, principalmente, à média da produtividade da cultura do milho para a região. Os resultados indicam que é necessário considerar, ainda, os erros amostrais de campo e o erro do próprio modelo, para permitir um melhor ajustamento entre dados observados e simulados.

A distribuição de carboidratos para as diversas partes da planta ainda é pouco detalhada e duvidosa, devido ao fato de esse mecanismo depender de inúmeras variáveis e de fatores ambientais, como fotoperíodo, solo, umidade do solo e nutrição mineral, que não foram tratados no modelo proposto.

Há de se considerar que a escolha dos parâmetros de inicialização do modelo ainda é muito empírica para regiões tropicais e, particularmente, para regiões semi-áridas como o Nordeste.

Do exposto, pode-se inferir que, através do modelo potencial proposto neste trabalho, as causas da produtividade baixa, na região em estudo, podem estar associadas a temperaturas mais elevadas, influenciando as taxas de respiração de manutenção da cultura.

O modelo proposto neste trabalho enfatiza a necessidade de desenvolver pesquisas experimentais que possam contribuir para o desenvolvimento de modelos para as condições do Brasil.

4.3. Testes de sensibilidade

4.3.1. Eficiência fotossintética (Alpha)

A fotossíntese da folha é uma curva que cresce em resposta à radiação. De fato, o aumento dos níveis de radiação disponíveis e sua utilização para o processo de fotossíntese são condicionados pela declinação da curva, sendo conhecidos como α , a eficiência fotossintética inicial da planta.

Esse parâmetro depende essencialmente de fatores ambientais como a radiação e da estrutura fisiológica e bioquímica da planta.

Na Figura 16 está ilustrada a análise de sensibilidade de α . Os valores de acúmulo de matéria seca total da parte aérea, das folhas, do caule e das raízes e o rendimento de grãos aumentaram significativamente com a mudança de apenas $1.0\text{E-}09 \text{ kgCO}_2\text{J}^{-1}$, ou seja, 1%.

Os valores atribuídos ao parâmetro α nos modelos de simulação para a cultura do milho estão entre $1.1\text{E-}09$ e $2.5\text{E-}09 \text{ kgCO}_2\text{J}^{-1}\text{s}^{-1}$. Os valores recomendados por BOONS-PRINS et al. (1993) e PENNING De VRIES et al. (1989) estão entre $1.4\text{E-}09$ e $2.5\text{E-}09 \text{ kgCO}_2\text{J}^{-1}\text{s}^{-1}$.

Em regiões onde a fotossíntese não sofre restrições do ambiente, principalmente com relação à radiação solar, o valor de alfa é em torno de $1.9\text{E-}08$ e $2.5\text{E-}08 \text{ kgCO}_2\text{J}^{-1}\text{s}^{-1}$ (GOUDRIAN e LAAR, 1994). Este valor indica uma das causas da grande variabilidade produtiva da cultura do milho de região para região.

Na Figura 16 pode-se verificar ainda que a produtividade de grãos é bastante alterada de acordo com a mudança de alfa. Essa variabilidade no comportamento da eficiência fotossintética indica a necessidade de estabelecer experimentos para verificar os valores específicos de α .

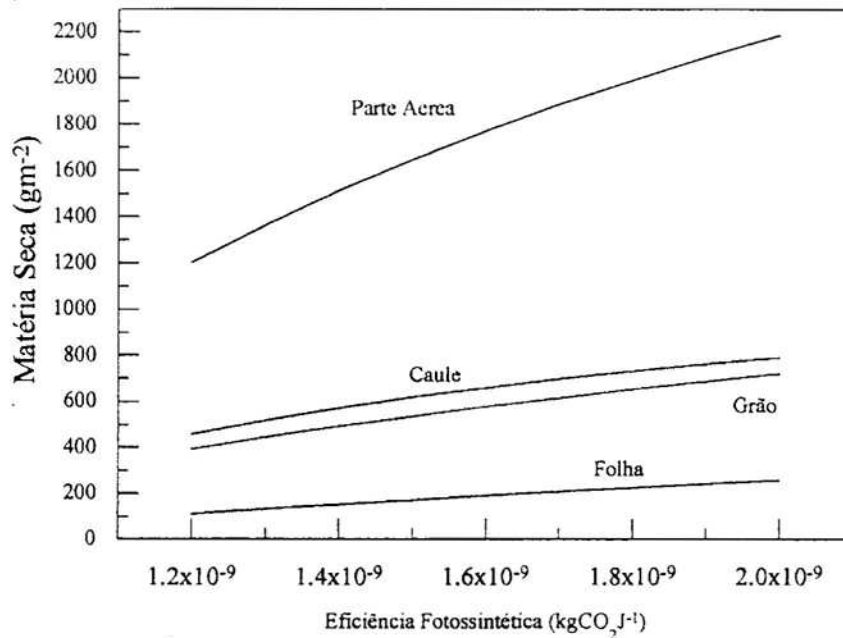


Figura 16- Análise de sensibilidade da matéria seca da parte aérea, das folhas, do caule e da produtividade final de grãos, relativa à eficiência fotossintética (∞).

4.3.2. Fotossíntese máxima (Pmax)

A fotossíntese máxima da cultura é a habilidade que a planta ou a comunidade de plantas tem de atingir valores máximos de fotossíntese. A fotossíntese máxima depende da fisiologia da cultura, assim como das condições ambientais a que está submetida a planta. Há evidências de que o milho, por se tratar de uma planta de mecanismo C4 e ser muito eficiente no processo fotossintético, quase nunca alcança seu potencial genético quanto à saturação da fotossíntese (TAIZ e ZEIGER, 1991; SALISBURY, 1992).

Esse fato pode ser discutido através da sensibilidade do parâmetro Pmax (fotossíntese máxima). Observa-se na Figura 17 que não são muito pronunciadas as alterações na fotossíntese máxima da cultura, quando comparada ao parâmetro

alfa. Verifica-se, ainda, que não há uma grande variação nos valores de acúmulo de matéria seca e na produtividade final dos grãos para a cultura do milho.

Os valores normalmente atribuídos a P_{max} são da ordem de $1.2E-06$ a $2.3E-06 \text{ kgCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (BOONS-PRINS et al., 1993). Alterações de 50 a 100 % causam muito pouca variação de matéria seca.

De fato, a fotossíntese máxima, quando é determinada em laboratório, depende fundamentalmente da concentração de CO_2 e da intensidade da radiação. Apesar de a concentração de CO_2 não ser homogênea no *stand* de plantas, assim como os níveis de radiação fotossinteticamente ativa (PAR), eles normalmente são suficientes para a comunidade de plantas.

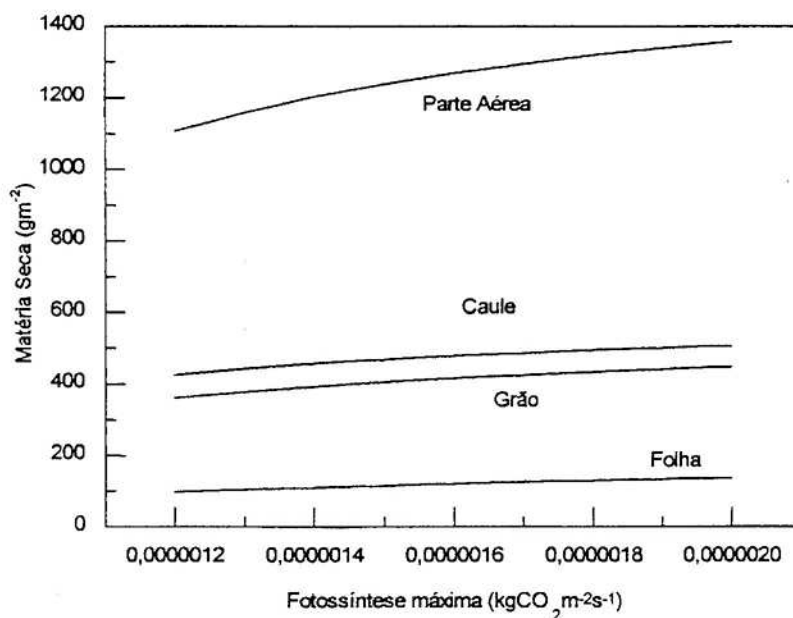


Figura 17 - Análise de sensibilidade da matéria seca da parte aérea, das folhas, do caule e da produtividade final de grãos, relativa à fotossíntese máxima (P_{max}).

4.3.3. Respiração de manutenção (R_m)

Nas Figura 18 é apresentada a análise de sensibilidade do parâmetro respiração de manutenção (R_m). Os valores recomendados para a cultura do

milho oscilam de 0,015 a 0,030 $\text{kgCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$, dependendo do componente estrutural da planta.

Verifica-se que a respiração de manutenção é responsável por grandes perdas de matéria seca. A principal causa das perdas energéticas da planta está fortemente associada com a temperatura. Como já comentado, a R_m é dependente da temperatura através do conceito de Q_{10} . Dessa forma, pode-se inferir que há uma tendência de as taxas respiratórias serem superiores nas regiões áridas e semi-áridas, onde predominam temperaturas superiores a 30°C .

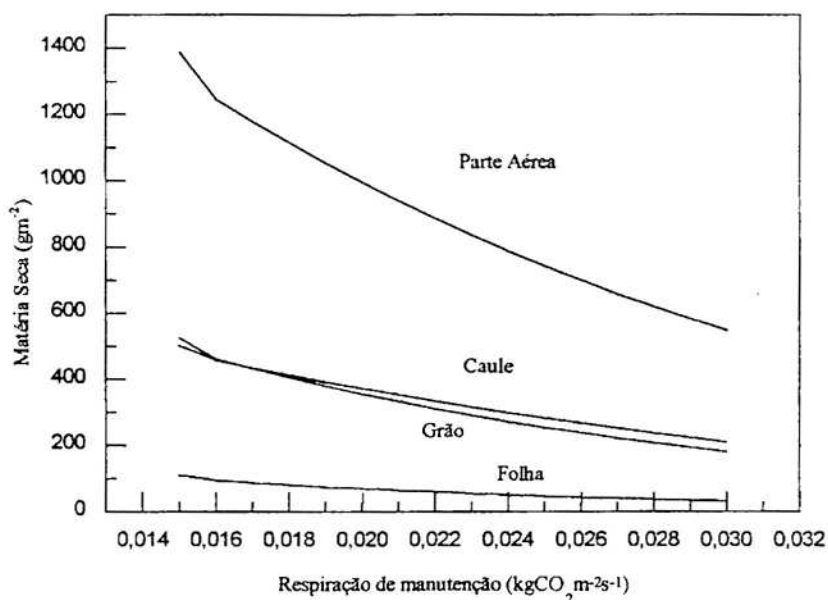


Figura 18 - Análise de sensibilidade da matéria seca da parte aérea, das folhas, do caule e da produtividade de grãos, relativa à respiração de manutenção (R_m).

4.3.4. Respiração de crescimento (E_g)

Na Figura 19 é ilustrada a análise de sensibilidade relativa à eficiência de conversão de carboidratos em matéria seca (E_g).

A eficiência de conversão refere-se à capacidade que a planta tem de converter carboidratos em outros compostos estruturais, como proteínas, lignina,

ácidos nucleicos, enzimas, etc. Essa eficiência é fundamental para o crescimento da planta.

O milho é eficiente na absorção, na síntese e no transporte de carboidratos (SALISBURY, 1992). A análise de sensibilidade de Eg, no intervalo de 60 a 80 %, é bem pronunciada, principalmente entre 70 e 80% de conversão. Os intervalos utilizados nos modelos de simulação com a cultura do milho são normalmente entre 0,60 e 0,75 % (BOONS-PRINS et al., 1993). GOUDRIAN e LAAR (1994) afirmam que apenas culturas em condições ótimas têm eficiência em torno de 0,75%.

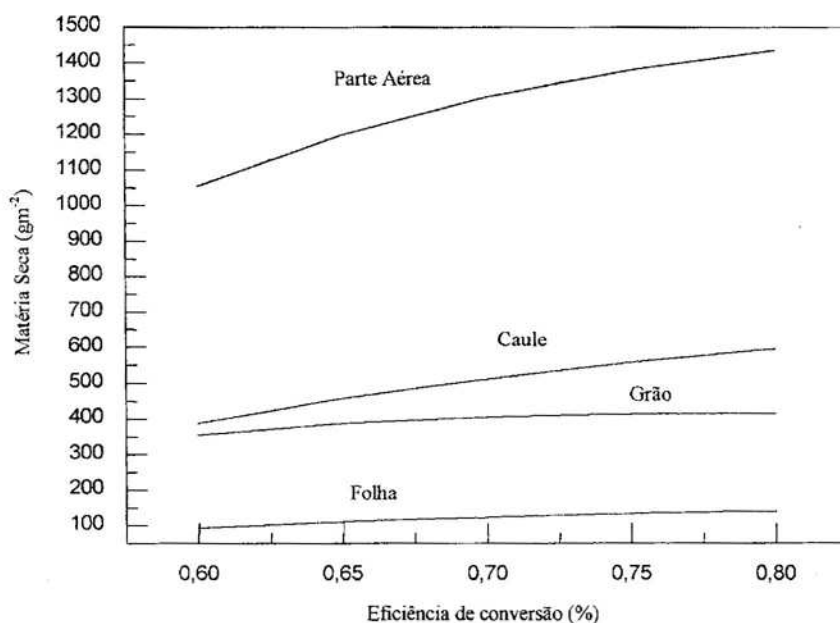


Figura 19 - Análise de sensibilidade da matéria seca da parte aérea, das folhas, do caule e da produtividade de grãos, relativa à eficiência de conversão (Eg).

4.3.5. Coeficiente de extinção (k)

A Figura 20 ilustra a análise de sensibilidade com o parâmetro coeficiente de extinção da radiação no dossel vegetativo (k), que é fundamental para o processo de interceptação e captura de radiação pela cultura.

Esse parâmetro depende da arquitetura do dossel vegetativo. No milho, um terço da parte inferior das folhas é responsável pela acumulação de fotoassimilados e de 70 a 80% da fotossíntese da cultura.

Esse fato é notado na análise de sensibilidade de k , quando a variação de apenas 10% (0,7) de k e os resultados simulados para o acúmulo de matéria seca e de produtividade de grãos são alterados significativamente.

No intervalo de 0,7 a 0,8 a variação é bastante pronunciada, devido ao fato de a distribuição de radiação no dossel vegetativo, provavelmente, alterar os níveis de radiação para cultura do milho.

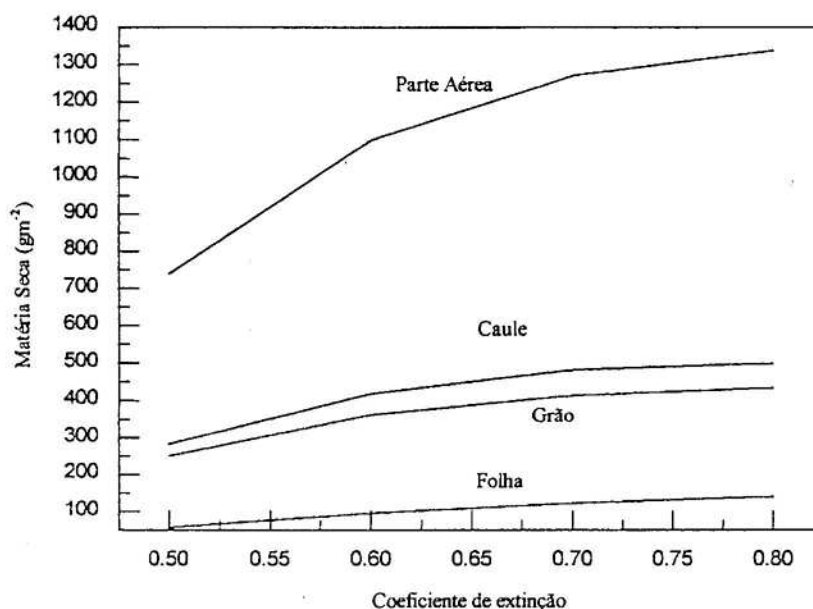


Figura 20 - Análise de sensibilidade da matéria seca da parte aérea, das folhas, do caule e da produtividade de grãos, relativa ao coeficiente de extinção da cultura (k).

4.3.6. Coeficiente de transmissão (m)

Apesar de ser sensível, o coeficiente de transmissão da radiação não apresentou variações pronunciadas na análise de sensibilidade do acúmulo de matéria seca e no rendimento de grãos (Figura 21).

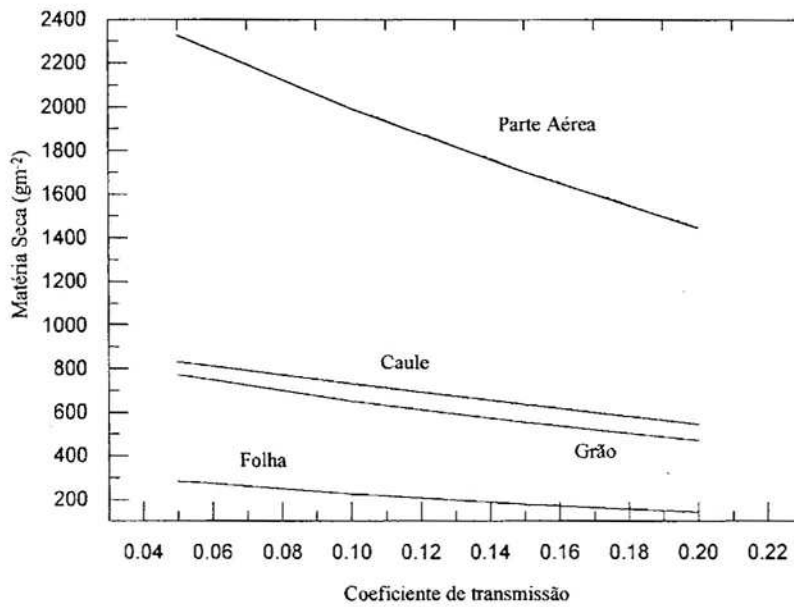


Figura 21 - Análise de sensibilidade da matéria seca da parte aérea, das folhas, do caule e da produtividade de grãos, relativa ao coeficiente de transmissão da radiação para cultura (m).

Apenas quando os valores são inferiores a 0,1, observa-se tendência de diminuição da matéria seca e da produtividade da cultura. No entanto, raramente são utilizados valores inferiores a 10% da radiação transmitida pelas folhas.

4.3.7. Taxa de reação bioquímica (Q10)

Na Figura 22 é ilustrada a análise de sensibilidade da taxa de reação bioquímica, relativa ao aumento da temperatura (Q10). Pode-se observar que, à medida que os valores de Q10 aumentam, há tendência linear de decréscimo de matéria seca.

Esse parâmetro é bastante sensível à mudança. Observou-se que, à medida que ele aumenta, na ordem de 10%, o acúmulo de matéria seca e a produtividade de grãos diminuem de 10 a 20%. De fato, como já comentado, o aumento de temperatura é responsável direto pela taxa de desenvolvimento da cultura, na fotossíntese e na respiração. Esse comportamento é devido ao desequilíbrio no

balanço de carbono entre perdas e ganhos de carboidratos, provocado pela alteração nas reações bioquímicas da planta.

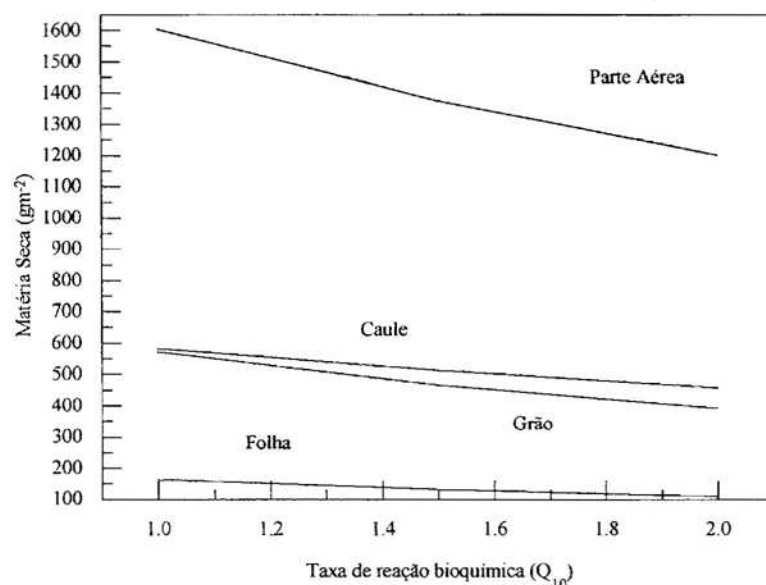


Figura 22 - Análise de sensibilidade da matéria seca da parte aérea, das folhas, do caule e da produtividade de grãos, relativa à taxa de reações bioquímicas (Q_{10}).

4.3.8. Área foliar específica (AFE)

Na Figura 23 é ilustrada a análise de sensibilidade da área foliar específica (SLA), relativa ao aumento da matéria seca e produtividade de grãos. Observa-se que o aumento da área foliar específica produz grande tendência de acréscimo na matéria seca do caule, das folhas e da produtividade de grãos.

Esse parâmetro é muito sensível e fundamental para os modelos de simulação. De fato, a área foliar específica é responsável pelo cálculo do índice de área foliar. Dessa forma, a fotossíntese bruta diária responde aos níveis de radiação interceptada pelo índice de área foliar, que expressa a quantidade de folhas por unidade de área.

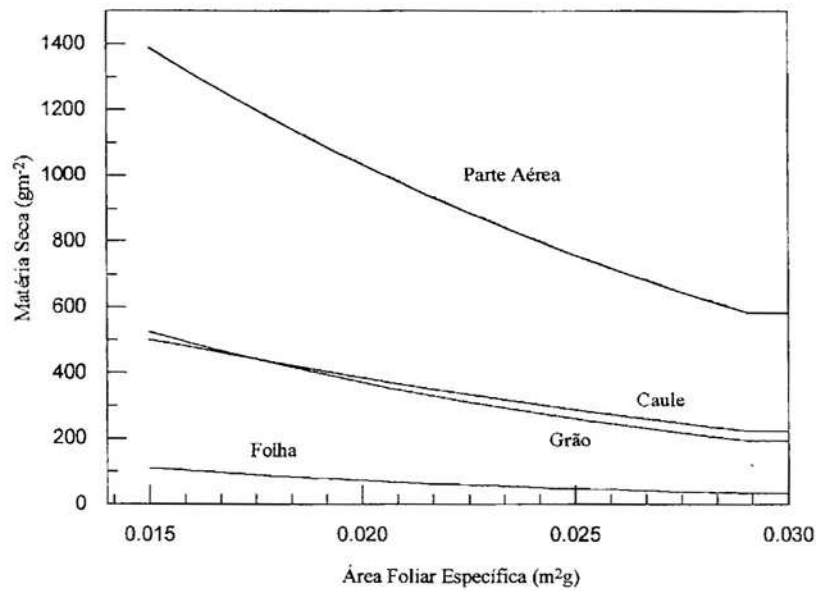


Figura 23- Análise de sensibilidade da matéria seca da parte aérea, das folhas, do caule e da produtividade de grãos, relativa à área foliar específica (SLA).

4.4. Otimização dos parâmetros do modelo

Após os testes de sensibilidade, foram atribuídos valores aos parâmetros fisiológicos da cultura do milho, para observar os resultados com relação à otimização do modelo.

O processo de otimização do modelo consiste em ajustar os valores dos parâmetros de forma que seja mínimo o erro entre os dados observados e simulados.

A teoria utilizada através do ModelMaker é a de Marquardt, em que a medida de desvio é X^2 (qui-quadrado), definido como:

$$X^2 = \sum \frac{(m_i - \sigma_i)^2}{\varepsilon_i^2} \quad (16)$$

em que

ε_i = erro estimado para observação; e

m_i = valor simulado para a enésima observação.

De acordo com a série de Taylor, uma função $f(x)$ pode aproximar um valor x a esta função da seguinte forma:

$$f(x + \Delta x) = f(x) + \frac{df}{dx} \Delta x + \frac{1}{2} \frac{d^2 f}{dx^2} \Delta x^2 + \frac{1}{3} \frac{d^3 f}{dx^3} \Delta x^3 \dots \quad (17)$$

A função de interesse para a otimização do modelo é X^2 ; como uma função dos parâmetros do modelo, pode ser descrita da seguinte forma:

$$X^2(a) \cong c - d * a + \frac{1}{2} a * D * a \quad (18)$$

em que

a = vetor do parâmetro analisado;

c = constante para X^2 mínimo;

$-d$ = vetor representando a derivada de X^2 em função do parâmetro a ; e

D = matriz do dobro da derivada de X^2 em função de a , denominada curvatura da matriz.

Diferenciando, para obter a relação de gradiente da função X^2 :

$$X^2 = a * D - d \quad (19)$$

Minimizando X^2 , então:

$$a_{min} * D - d = 0 \quad (20)$$

Dessa forma, o valor do gradiente do erro para um determinado parâmetro a corrente é:

$$\nabla X^2(a_{cor}) = a_{cor} * D - d, \quad (21)$$

Subtraindo as duas equações e multiplicando pela matriz inversa D^{-1} , tem-se o valor mínimo do parâmetro a com o menor erro X^2 :

$$a_{min} = a_{cor} - D^{-1} * [-\nabla X^2(a_{cor})] \quad (22)$$

Os valores para otimização dos valores de Pm e Rm foram: 1.4E-06 kgm⁻²s⁻¹ e 0.0020 kgm⁻²s⁻¹, respectivamente. O valor recomendado por PENNING De VRIES et al. (1989), KEULEN e WOLF (1986), THORNLEY (1977) e GOUDRIAN e LAAR (1994) é de 1.4E-06 kgm⁻²s⁻¹ para fotossíntese máxima e de 0,017 kgm⁻²s⁻¹ para respiração. BOONS-PRINS et al. (1993) recomendam, no entanto, valores de 0,0017 médios e, dependendo da região, valores de 1.9E-06 kgm⁻²s⁻¹, para a fotossíntese, e 0,020 a 0,030 kgm⁻²s⁻¹, para a respiração de manutenção.

O quadro 4 mostra os resultados estatísticos para a otimização dos parâmetros Pm e Rm do modelo.

Quadro 4 - Análise de variância para otimização dos parâmetros Pm e Rm

	GL	SQ	QM	F	Significância
Modelo	2	1.3159E+09	6.5796E+08	862.93	< 0.001
Resíduo (X ²)	109	083106345.72	762443.53872		
Total	111	1.399E+09			
R ² =	0,9406				

4.4.1. Resultados simulados e calculados após a otimização do modelo

Após a estimativa dos parâmetros respiração e fotossíntese máxima da cultura, representando o balanço energético entre o ganho e a perda de carbono pela cultura, o modelo foi executado com os parâmetros relativos à otimização.

No Quadro 5 são apresentados os valores finais de matéria seca da parte aérea, das raízes, do caule, das folhas, dos órgãos reprodutivos e da produtividade final de grãos depois da otimização do modelo.

Quadro 5 - Resultados finais observados e calculados pelo modelo, do acúmulo de matéria seca da parte aérea, do caule, das folhas, das raízes, dos órgãos reprodutivos, da produtividade final de grão, e o índice de área foliar máximo, depois da otimização dos parâmetros Pm e Rm

	Parte aérea gm ⁻²	Folhas gm ⁻²	Caule gm ⁻²	Raízes gm ⁻²	Grãos gm ⁻²	Reprodutivo gm ⁻²	IAF m ² m ⁻²
Observado	1144.38	108.53	481.15	61,50	410.00	144,70	4.27
Simulado	1202,62	109.86	393.02	87.95	456,93	242.10	4.39
Ajuste (%)	94,0	99.0	81.7	57,0	88.5	67,3	97.1

RESUMOS E CONCLUSÕES

Desenvolveu-se um modelo potencial para simular o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade da cultura do milho (*Zea mays* L.). Para comparar os resultados calculados pelo modelo, foi feito um experimento de campo, para determinações da matéria seca do caule, das folhas, das raízes, do índice de área foliar e da produtividade de grãos. Foram utilizados dados climáticos de temperatura e radiação solar da Estação Experimental de Vitória de Santo Antão – PE.

Esses resultados permitiram, como primeira aproximação, analisar a consistência do modelo desenvolvido neste estudo. Ainda que não sejam suficientes para uma análise mais completa do sistema solo - planta - atmosfera, os resultados permitem inferir quais as dificuldades mais pronunciadas das pressuposições e hipóteses utilizadas na concepção do modelo proposto neste trabalho.

O modelo mostrou-se consistente para a simulação do crescimento, do desenvolvimento e da produtividade de grãos. O modelo apresentou, em média, para a parte aérea, 84 % de ajustamento para as estimativas de acúmulo de matéria seca total na maturidade fisiológica e 88,0 % para a produtividade de grãos.

Entretanto, o modelo não foi capaz de acompanhar as variações de matéria seca durante o crescimento e o desenvolvimento da cultura. Observou-se que, durante o estágio reprodutivo, os dados calculados do acúmulo de matéria seca são menos precisos, quando comparados com os da fase lenta e de maturação fisiológica observados em campo.

Os parâmetros mais sensíveis à mudança foram a eficiência fotossintética e a respiração de manutenção. Observou-se, ainda, que as variações de 1 a 10% nesses parâmetros provocaram grandes alterações na distribuição de matéria seca e na produtividade de grãos.

RECOMENDAÇÕES

As inter-relações a que estão submetidas as plantas ou a comunidade de plantas são complexas de serem tratadas no sistema solo - planta - atmosfera. As aproximações levam em conta apenas uma parte limitada da realidade, o que provoca erros dos modelos de simulação.

O presente trabalho foi um estudo utilizando somente as interações planta-clima. Outros fatores, como o solo, a nutrição mineral e a disponibilidade de água, não foram abordados. Dessa forma, sugere-se que pesquisas futuras incluam esses mecanismos que afetou diretamente a produtividade da cultura do milho.

O modelo de produtividade potencial utilizou parâmetros gerais da cultura, normalmente oriundos de diferentes regiões. Recomenda-se o desenvolvimento de pesquisas específicas para a determinação dos parâmetros de eficiência fotossintética, respiração e fotossíntese máxima da cultura.

O modelo foi capaz de estimar a produtividade agrícola para a região em estudo. No entanto, sugere-se sua utilização para estudos de produtividade na Zona da Mata de Pernambuco, assim como no meio científico, de forma a explorar seu potencial em relação à análise das interações com o sistema solo - planta - atmosfera.

Sua utilização pode ser ainda melhorada com a incorporação de modelos econômicos para a região. Deve-se, também, destacar a importância da capacidade do modelo no sentido de inferir as causas e conseqüências das variações na produtividade, em função das variáveis climáticas tratadas e de parâmetros fisiológicos da cultura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACOCK, B., ACOCK, M. Potential for using long-term field research data to develop and validate crop simulators. **Agron. Journ.**, Madison, v. 83, p. 56-61, 1991.
- 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 capt. by crops**. 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.
- BAIR, W. Crop weather analysis model: review and model development. **Journ. of Applied Meteorol.**, Boston, v. 12, p. 937-47, 1973.
- BARROS, L.C.G. **Desenvolvimento, adaptação e avaliação de modelos matemáticos no Nordeste do Brasil**. Penedo: EMBRAPA, 1993, 90p.
- BERRY, F.A. Jr, BOLLAY, E., BEERS, N.R. **Handbook of Meteorol.** New York: McGraw-Hill, 1945. 1068p
- BOONS-PRINS, E.R., KONING de G.H.J., VAN DIPPEN, C.A. et al. **Crop specific simulat. Paramet. for yield forecast. across the Europ. Commun.** Wageningen: Netherlands, 1993. 204p.

- BROUWER, R. Distribution of dry matter in the plant. **Neth. J. Agric. Sci.**, Wageningen, v.10, p. 361-75, 1962.
- 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, DF.: CFP, 1982. p.21-46. (Coleção Análise e Pesquisa, 24).
- CAMARGO, A.P., CHIARINI, J.V., DONZELI, P.L. et al. **Zoneamento 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 estimativas da produtividade para quatro cultivares de soja no Estado de São Paulo**. Piracicaba: USP, 1984. 96p. Dissertação (Mestrado em Agrometeorologia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - USP, 1984.
- CANO, M.A.O. **Ecofisiologia vegetal**. Viçosa, MG: UFV, 1984. 250p.(Mimeogr.)
- CHAN, A.K. **Simulation of growth and development of Faba Bean (*vicia faba L.*)** University of Reading, UK, 1992. 217p. (Ph.D. Thesis).
- CHARLES-EDWARDS, D.A., ACOCK, B. Growth response of a Chrysanthemum crop to the environment. II A mathematical analysis relating photosynthesis and growth. **Ann. Bot.**, New York, v.41, 1977.
- COMERMA, J., GUENNI, L., MEDINA, G. Validacion del balance hidrico del modelo CERS-Maize en la zona de Maracay, Estado Aragua-Venezuela. **Agronom. Tropical**, Maracay, v. 35, n. 4-6, p. 115-32, 1985.
- COSTA, L.C. **Modelo agrometeorológico de previsão de produtividade da soja para as regiões do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, Minas Gerais**. Viçosa: UFV, 1988. 40p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, 1988.
- CURRY, R. B., BAKER, C. H., STREER, J.G. et al. A dynamic simulator of soybean growth and development. **Transact. of the ASAE**, St. Joseph, n.18, p. 963-8, 1975.

- CURRY, R.B., CHEN, H. Dynamic simulations of plant growth. Part II. Incorporation of actual daily weather data and partitioning of net photosynthate. **Transact. of the ASAE**, St. Joseph, n.14, p. 1170-5, 1971.
- ENCARNAÇÃO, F.A.F. **Avaliação do desempenho de um novo instrumento - o Hidro Saver - para determinação da lâmina de irrigação**. Piracicaba: ESALQ-USP, 1996. 60p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Recomendações técnicas para o cultivo do milho**. Brasília, DF, 1993. 204p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Mudanças e perspectivas para o ano 2000**. Brasília, DF, 1994. 76p.
- FANCELLI, A.L., LIMA, U.A. **Milho: produção, pré-procesamento e transformação agroindustrial**. São Paulo: Secretaria da Indústria, Comércio, Ciência e Tecnologia, 1986. 112p. (Extensão Agroindustrial, 5).
- FISCHER, R.A. The influence of rainfall on the yield of wheat at Rothamsted. **Phil. Trans. Roy. Soc.**, London, v.213, p. 89-142, 1924.
- FRANCE, J., THORNLEY, J.H.M. **Matemat. Models in Agricult.** The Quantitative Approach to problems in Agriculture and Related Sciences. London: Butterworth, 1984.
- FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Anuário Estatístico do Brasil**. Rio de Janeiro, 1992.
- GILMORE, E.L., ROGERS, J.J. Heat units as a method of measuring maturity in corn. **Agron. Journ.**, Madison, v. 50, p. 611-5, 1958.
- GOMES, J., CARNEIRO, G.E.S. Avaliação estadual de cultivares de milho safra 1991/1992. **Informe de Pesquisa IAPAR**, Londrina, v. 17, n. 104, p. 3-91, 1993.
- GOUDRIAN, J., LAAR, H.H.V. **Model. potential crop growth processes**. Wageningen: Academic Publishers, 1994, 238p.
- GOUDRIAN, J. **Crop Micrometeorol.:** a simulation study. Wageningen: Academic Press, 1977. 249p.

- GOUDRIAN, J. **Simulation of crop growth**: course book Wageningen Agricultural University. Department of Theoretical Production Ecology, 1992. 127p.
- HANWAY, J.J. Growth stages of corn (*Zea mays*, L.). **Agron. Journ.**, Madison, v. 55, n. 5, p. 487-92, 1963.
- HEEMST, H.D.J. The distribution of the dry matter during growth of a crop potato. **Potato Research**, Wageningen, v. 29, p. 55-66., 1986.
- HODGES, T., EVANS, D.W. Leaf emergence and leaf duration related to thermal time calculations in CERS-Maize. **Agron. Journ.**, Madison, v. 84, n. 4, p. 624-30, 1992.
- HUME, C.J., CALLANDER, B.A. Agrometeorology and model building. **Outlook on Agricult.**, Washington, D.C., v. 19, n. 1, p. 25-31, 1990.
- HUNT, R. Concepts in plant growth analysis. In: **PLANT growth curves**: the theoretical approach to plant growth. London: Edward Arnold, 1982. cap. 2, p. 14-46.
- HUNT, R. The Fitted curve in plant growth studies In: ROSE, D.A., CHARLES-EDWARDS, D.A. **Mathem. and Plant Physiol.** London: Academic Press, 1981. p. 283-98.
- IPA - Folder da variedade BR 3056, 1994.
- JOHNSON, I.R. Models of Respiration. In: K. WISOL, J.D. HESKETH (Ed.). **Plant Growth model. and Resource Managem.**. Boca Raton: CRC Press, 1987. v.1.
- JOHNSON, I.R., THORNLEY, J.H.M. Vegetative and crop growth model incorporating leaf area expansion and senescence, and applied to grass. **Plant, Cell and Environm.**, Oxford, v.6, p.721-9, 1983.
- JOHNSON, I.R., AMENIZE, T.E, THORNLEY, J.H.M. A model of grass growth. **Ann. Bot.**, Oxford, v. 51, p. 599-609, 1983.
- JONES, P.N., KINIRY, J.R. **CERS-Maize**: a simulation model of maize growth and development. College Station, Texas A e M. University Press, 1986. 194p.

- KEULEN, H. VAN., WOLF, J. **Modelling of agricultural production: weather, soils and crops.** Wageningen: Centre for Agricultural Publishing and Documentation. 1986.
- KEULEN, H. VAN., GOUDRIAN, J., SELIGMAN, N.G. **Modelling the effects of Nitrogen on Canopy development and crop growth.** In: PLANT Canopies: their growth, form and function. Cambridge: Cambridge University Press, 1989.
- KEULEN, H.V., VRIES, F.W.T.P., DREES, E.M. A summary model for crop growth. In: VRIES, F.W.T.P., LAAR, H.H.V. **Simulation of plant growth and crop production.** Wageningen: Pudoc, 1982. P. 87-92.
- KRAMER, P.J. **Water Relations of Plants.** New York: Academic Press, 1986.
- LEAL, B.G. **Caracterização da radiação, análise de crescimento e do desenvolvimento de milho em três densidades de plantio.** Viçosa: UFV, 1993. 55p. Dissertação – Universidade Federal de Viçosa – 1993.
- LIMA, M.G. **Calibração e validação do modelo CERS-Maize em condições tropicais do Brasil.** Piracicaba: USP, 1995. 119p. Tese - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - USP, 1995.
- LIU, W.T.H., BOTNER, D.M., SAKAMOTO, C.M. Application of CERS-Maize model to yield prediction of Brazilian maize hybrid. **Agricult. and Forest Meteorol.**, Amsterdam, v. 45, n. 3-4, p. 299-312, 1989.
- MACHADO, E.C. **Um modelo matemático-fisiológico para simular o acúmulo de matéria seca na cultura de cana-de-açúcar (*Saccharum sp.*).** Campinas: UNICAMP, 1981. 115p. Dissertação - Universidade de Campinas, 1981.
- MAGALHÃES, A.C.N. Análise quantitativa do crescimento. In: FERRI, M.G. **Fisiologia Vegetal.** São Paulo: EDUSP, 1979. v.1.
- MAGALHÃES, A.C.N., SILVA, W.J. Determinantes genético-fisiológicos da produtividade do milho. In: PATERNIANI, E. **Melhoramento e produção do milho no Brasil.** Piracicaba: ESALQ./Marprint, 1978. 650p.

- McCREE, K.J. An equation for the rate of respiration of white clover plants growing under controlled conditions. In: SETLIK, I. (Ed.). **Predict. and measur. of photosynth. Productiv.**. Wageningen: Pudoc, 1970. p. 221-9.
- McCREE, K.J. Equations for the rate of dark respiration of white clover and grain sorghum, as function of dry weight, photosynthetic rate and temperature. **Crop Science**, Madison, v. 14, p. 509-514, 1974.
- MELGES, H. **Crescimento, conversão da energia solar e modulação da soja (*Glycine max* L. Merrill) sob quatro níveis de radiação solar em Viçosa-MG.** Viçosa: UFV, 1993. 78p. Dissertação (Mestrado em Fisiologia Vegetal) - Universidade Federal de Viçosa, 1993.
- MIGLIORANZA, E. **Modelo matemático-fisiológico para simular o crescimento e a produtividade da cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.).** Viçosa, MG: UFV, 1992. 183p. Tese (Doutorado em Fisiologia Vegetal) - Universidade Federal de Viçosa, 1992
- MODELMAKER, version 2.0 SB technology. Oxford: Scientific, 1993-1994.
- MONSI, M., SAEKI, T. Uber 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.**, Oxford, v. 107, p. 749-74, 1981.
- MONTEITH, J.L., UNSWORTH, M.H. **Principles of envirom. physics.** 2.ed. London: Edward Arnold, 1990. 291p.
- MONTEITH, J.L. Light and crop production. **Field Crop Abstr.** v.18, n. 4, p.213-9, 1965.
- MONTEITH, J.L., SZEICH, G. The relation balance of bare soil and vegetation. **Quart. Journ. of the Royal Meteorol. Soc.**, Oxford, v. 87, p. 159-69, 1961.
- MOTA, F.S. Temperatura do ar e plantas cultivadas. In: **METEOROLOGIA Agrícola**, São Paulo: Nobel, 1975. cap. 8, p. 160-3.

- 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.
- PASSIOURA, J.B. Sense and nosense in crop simulation. **Journ. Aust. Inst. Agri. Sci.**, Austrália, v. 39, p. 181-183, 1973.
- PENNING De VRIES, F.T.W., VAN LAAR, H.H. **Simulation of plant growth and crop production**. Wageningen: Pudoc, 1982. 308p.
- PENNING De VRIES, F.W.T. Evaluation of simulation models in agriculture and biology: conclusions of a workshop. **Agricult. Systems**, Essex, v. 2, p. 99-107, 1987.
- PENNING De VRIES, F.W.T. The cost of maintenance processes in plant cells. **Ann. of Bot.**, Wageningen, v. 39, p. 77-92, 1975.
- PENNING De VRIES, F.W.T. The use of assimilates in higher plants. In :COOPER, J.P. (Ed.). **Photosynthesis and productivity in different environments**. London: Cambridge University Press, 1975. p.459-480.
- 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. (Ed.). **Climatic risk in crop production models e management for the semiarid tropics e subtropics**. Wallingford: CAB International, 1991. p. 123-40.
- PENNING De VRIES, F.W.T, BRUNSTING, A.H.M., VAN LAAR, H.H. Products, requirements and efficiency of biosynthesis: a quantitative approach. **J. Theoret. Biology**, London, v. 45, p. 339-377, 1974.
- PENNING De VRIES, F.W.T, WITLAGE, J.M., KREMER, D. Rates of respiration and increase in structural dry matter in young wheat, kyegrass and maize plants in relation to temperature, to water stress and to their sugar content. **Ann. Bot.**, Wageningen, v. 44, p. 495-609, 1979.

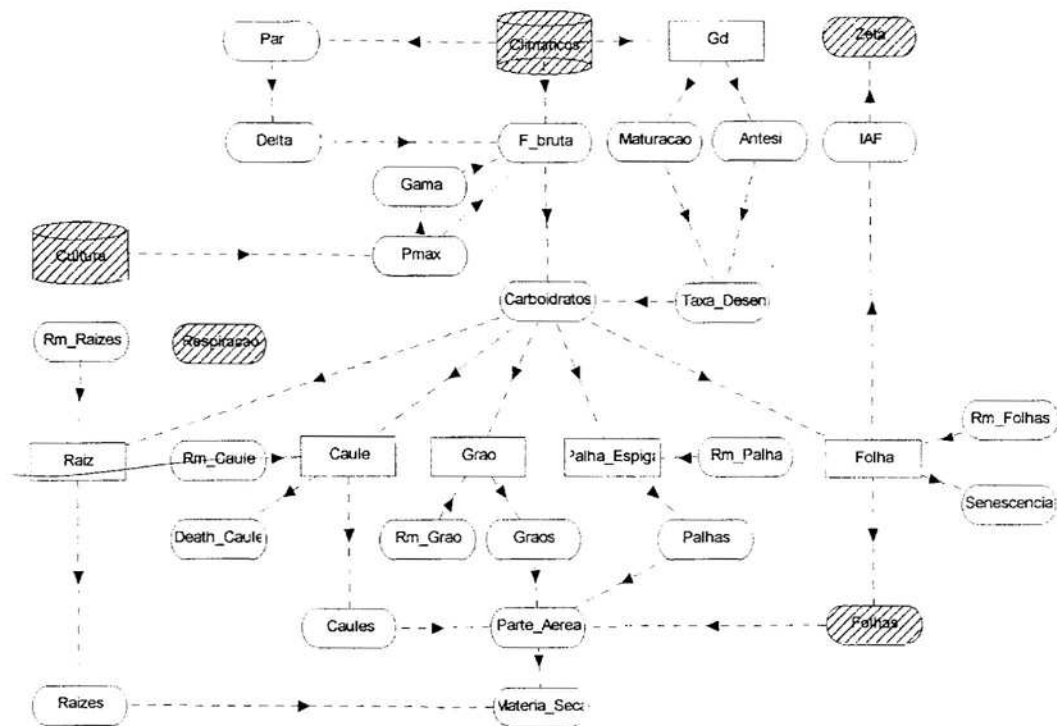
- PEREIRA, A.R. Simulação do crescimento e da produtividade. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DE AGUA NA AGRICULTURA, 1987, Campinas. **Anais...** Campinas: Fundação Cargill, 1987, v. 17.
- PESSARAKLI, M. **Handbook of plant and crop physiology**. New York: Marcel Decker Publishing, 1995. 1004p.
- PLETT, S. Comparasion of seasonal thermal indices for measurement of corn maturity in a praire enviroment. **Canad. Journ. of Plant Science**, Ottawa, v. 72, p. 1157-62, 1992.
- RABINOWITCH, E.I. Phothosynthesis and related processes. **Interscience**. New York, v. 2, n. 1, 1951.
- REYNOLDS, J.F. Some misconceptions of mathematical modelling. **What's New in Plant Physiology**, London, v. 10, n. 11, p. 41-4, 1979.
- REYNOLDS, J.F., ACOCK, B. Predicting the response of plants to increasing carbon dioxide: a critique of plant growth models. **Ecolog. Model.** Amsterdam, v. 29, p. 107-29, 1985.
- ROBERTSON, G.W. (Ed). **Guidelines on crop-weather models**. Washington, DC: World Meteorological Organization, 1983. 113p. (World Climate Application Programme, WCP-50).
- ROSENBERG, N.J., BLAD, B.L., VERMA, S.B. **Microclimate-The biological environment**. New York: Jonh Wiley and Sons, 1983. 495p.
- SALISBURY, F.B. **Plant Physiology**. Belmont: Wadsworth, 1992.
- SIBMA, L. Maximization of arable crop yields in the Netherlands. **Netherl. Journ. of Agricult. Sc.**, Wageningen, v. 25, p. 278-287, 1977.
- SILVA, M.A.V. **Análise de crescimento, desenvolvimento e eficiência do uso da radiação solar para dois cultivares de milho**. Viçosa: UFV, 1995. 63p. Dissertação - Universidade Federal de Viçosa, 1995.
- SPLINTER, W.E. Modelling of plant growth for yield prediction. **Agricult. Meteorol.**, Amsterdam, v. 14, p. 243-5, 1974.

- STEWART, R.K., BIDWELL, R.G.S. Energy and Carbon Metabolism. In: **PLANT Physiology**. New York: Academic Press, 1983. v. 3.
- TAIZ, L., ZEIGER, E. **Plant Physiology**. Belmont: Cummings Publishing, 1991. 565p.
- THORNLEY, J.H. Growth, maintenance and respiration: a re-interpretation. **Ann. of Bot.**, Wageningen, v. 41, p.1191-1203, 1977.
- THORNLEY, J.H. **Respirations, growth, and maintenance in plants**. London, n. 227, p. 304-305, 1970.
- THORNLEY, J.H., JOHNSON, I.R. **Plant and crop modelling**. London: Clarendon Press, Oxford Science Publications, 1990. 144p.
- THORNLEY, J.H.M. **Mathematical models in plant physiology**: a quantitative approach to problems in plant physiology. London: Academic Press, 1976, 318p.
- THORNTHWAITTE. C.W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, New Jersey, v. 38, n. 1, p. 54-94, 1948.
- VILLA NOVA, N.A., PEDRO Jr, M., PEREIRA, A.R., et al. Estimativa de graus-dia acumulados acima de qualquer temperatura base, em função das temperaturas máxima e mínima. **Cadernos de Ciências da Terra**, São Paulo, n. 30, 1972.
- WHISLER, F.D., ACOCK, B., BAKER, D.N., et al. Crop simulation models in agronomic systems. **Advances in Agron.**, New York, v. 40, p. 141-208, 1986.
- WITT, C.T. Simulation of living systems. In: PENNING DE VRIES, F.W.T., VAN LAAR, H.H. (Ed.). **Simulation of plant grow and crop production**. Wageningen: Pudoc, 1982. p. 3-8.
- WITT. C.T., GROUDRIAN, J. **Simulation of assimilation, respiration and transpiration of crops**, Wageningen: Pudoc, 1978. 141p.

APÊNDICE

APÊNDICE

Fluxograma do modelo no *software ModelMaker*



Descrição do modelo

Independent Variable: t

Parameter: $h = 86400.0 \pm 0.0$

FOTOPERIODO (dia)

Parameter: $k = 0.65 \pm 0.0$

Coefficiente de extinção

Parameter: $EG = 0.65 \pm 0.0$

Eficiencia de crescimento %

Parameter: $pm20 = 0.0000014 \pm 0.0$

FOT MAXIMA $kgCO_2.ha^{-1}.s^{-1}$

Parameter: $tb = 10.0 \pm 0.0$

temp base (oC)

Parameter: $rm_{20} = 0.015 \pm 0.0$
Respiração de manutenção 20oC (kgCO₂.KG-1.s-1)

Parameter: $q_{10} = 2.0 \pm 0.0$
Q10

Parameter: $afe = 25.0 \pm 0.0$
AFE (m².kg-1) vem do PFE 400 kg.ha-1

Parameter: $m = 0.1 \pm 0.0$
coeficiente de transmissividade

Parameter: $\alpha = 0.000000012 \pm 0.0$
ALPHA (KgCO₂s-1)

Parameter: $EG_{fls} = 0.65 \pm 0.0$
Eficiencia de crescimento %

Parameter: $EG_{cau} = 0.6 \pm 0.0$
Eficiencia de crescimento % - 0.658

Parameter: $EG_{raiz} = 0.65 \pm 0.0$
Eficiencia de crescimento %

Parameter: $EG_{grao} = 0.65 \pm 0.0$
Eficiencia de crescimento % - 0.671

Parameter: $rm_{20fls} = 0.015 \pm 0.0$
Respiração de manutenção 20oC (kgCO₂.KG-1.s-1)

Parameter: $rm_{20raiz} = 0.015 \pm 0.0$
Respiração de manutenção 20oC (kgCO₂.KG-1.s-1)

Parameter: $rm_{20grao} = 0.02 \pm 0.0$
Respiração de manutenção 20oC (kgCO₂.KG-1.s-1)

Parameter: $EG_{palha} = 0.65 \pm 0.0$
Eficiencia de crescimento % - 0.671

Parameter: $rm_{20palha} = 0.02 \pm 0.0$
Respiração de manutenção 20oC (kgCO₂.KG-1.s-1)

Parameter: $rm_{20cau} = 0.02 \pm 0.0$
Respiração de manutenção 20oC (kgCO₂.KG-1.s-1)

Parameter: erro = 1.0 ± 0.01
AFE (m².kg⁻¹) vem do PFE 400 kg.ha⁻¹

Parameter: tt = 0.1 ± 0.0

Parameter: phi = 3.14 ± 0.0

Compartment: Gd Unconditional
Graus Dia. (oCd-1)

$dGd/dt = (\text{maxima} + \text{minima})/2 - 10$
Initial Value = 0

Compartment: Raiz Conditional
Kgm-2dia-1

$dRaiz/dt =$
(F_raizes*carboidratos-rm_raizes*Raiz)*egraiz by default
(F_raizes*carboidratos-respiracao-(raiz*0.001)*Raiz)*egraiz for t > 90

Initial Value = 0.000000000
Compartment: Folha Conditional
Kgm-2dia-1

$dFolha/dt =$
(f_fls*carboidratos-rm_folhas*Folha)*egfls by default
(f_fls*carboidratos-rm_folhas*Folha)*egfls-(folha*0.010) for t >= 67
Initial Value = 0.0001

Compartment: Caule Conditional
Kgm-2dia-1
 $dCaule/dt =$
(f_cau*carboidratos-rm_caule*caule)*egcau by default
((f_cau*carboidratos-rm_caule*caule)*egcau)-(caule*0.005) for t >= 75
Initial Value = 0.0000000000

Compartment: Grao Conditional
Kgm-2dia-1
 $dGrao/dt =$
((f_grao*carboidratos-rm_grao*grao)*eggrao)*0.70 for t >= 67
0 by default
Initial Value = 0.0000000000

Compartment: Palha_Espiga Conditional

Kgm-2dia-1

dPalha_Espiga/dt =

$((f_grao * carboidratos - Rm_Palha * palha_Espiga) * e_gpalha) * 0.30$ by default

Initial Value = 0.000000000001

Variable: Carboidratos Unconditional

KgCO2m-2dia-1 - carboidrato produzido

Carboidratos = $(F_bruta * 30 / 44)$

Variable: Par Unconditional Global

Jm-2dia-1

Par = $(radiacao * 1e6)$

Variable: FR Unconditional

Fracao_raizes

FR = f_raizes

Variable: FPE Unconditional

Peso_Esp

FPE = PE

Variable: FFLS Unconditional

Fracao_Folha

FFLS = F_fls

Variable: FC Unconditional

Fracao_caule

FC = f_cau

Variable: FG Unconditional

Fracao_Grao

FG = f_grao

Variable: Rm_Folhas Conditional

(KgCO2.Kg-1.d-1)

Rm_Folhas =

$rm20fls * Q10^{((media - 20) / 10)}$ by default

$0.020 * Q10^{((media - 20) / 10)}$ for $t \geq 67$

Variable: Rm_Raizes Unconditional

(KgCO2.Kg-1.d-1)

Rm_Raizes = $rm20raiz * Q10^{((media - 20) / 10)}$

Variable: Pmax Conditional

Fotossíntese Máxima (Kg.m-2.s-1)

Pmax =

$(0.0000005 * (\text{media} - \text{tb}) / (20 - \text{tb}))$ for $t \geq 70$ and $t < 90$

$(0.0000002 * (\text{media} - \text{tb}) / (20 - \text{tb}))$ for $t > 90$ and $t \leq 105$

$(0.00000008 * (\text{media} - \text{tb}) / (20 - \text{tb}))$ for $t > 105$

$(\text{pm}20 * (\text{media} - \text{tb}) / (20 - \text{tb}))$ by default

Variable: Delta Unconditional

Parametro componente da equação da fotossíntese

Delta = $\alpha * k * \text{Par} / h$

Variable: Gama Unconditional

Parâmetro componente da equação da fotossíntese

Gama = $(1 - m) * \text{Pmax}$

Variable: Zeta Unconditional Global

Parametro componente da equação da fotossíntese

Zeta = $\exp(-k * \text{laf})$

Variable: F_bruta Conditional

Fotossíntese Bruta (KgC02m-2s-1)

F_bruta =

$((\text{Pmax} * h / k) * \ln((\text{Delta} + \text{Gama} + (2 * \text{Delta} * \text{Gama} + \text{Gama}^2)^{1/2}) / (\text{Delta} * \text{Zeta} + \text{Gama} + (2 * \text{Delta} * \text{Gama} * \text{Zeta} + \text{Gama}^2)^{1/2})))$ by default

Variable: Respiracao Unconditional Global

KgCO2m-2dia-2

Respiracao = $\text{rm}20 * Q10^{((\text{media} - 20) / 10)}$

Variable: Maturacao Conditional

Maturacao =

$(\text{gd} - 950) / 800$ for $\text{gd} > 1090$

0 by default

Variable: Antesi Conditional

Antesi =

1 for $\text{gd} \geq 1090$

$\text{gd} / 950$ by default

Variable: Taxa_Desen Unconditional

Taxa_Desen = $\text{maturacao} + \text{antesi}$

Variable: Rm_Palha Unconditional

Rm_Palha = $\text{rm}20\text{Palha} * Q10^{((\text{media} - 20) / 10)}$

Variable: Rm_Caule Unconditional
(KgCO2.Kg-1.d-1)
 $Rm_Caule = rm20cau * Q10^{((media - 20)/10)}$

Variable: Rm_Grao Unconditional
(KgCO2.Kg-1.d-1)
 $Rm_Grao = rm20grao * Q10^{((media - 20)/10)}$

Variable: Death_Caule Conditional
Death_Caule =
caule*0.025 for $t \geq 95$
0 by default

Variable: IAF Conditional Global
ha/kg
IAF =
(folhas*0.001855) by default

Variable: Parte_Aerea Unconditional
Kggha-1
 $Parte_Aerea = (folhas + Caules + graos + palhas)$

Variable: Materia_Seca Unconditional Global
Materia_Seca = (Parte_Aerea + raizes)
Variable: Raizes Unconditional Global
Kggha-1
 $Raizes = (raiz * 10000)$

Variable: Folhas Conditional Global
Kggha-1
Folhas =
folha*10000 by default

Variable: Caules Conditional Global
Caules =
caule*10000 by default

Variable: Graos Unconditional Global
Kggha-1
 $Graos = grao * 10000$

Variable: Palhas Unconditional Global
Kggha-1
 $Palhas = palha_espiga * 10000$

Variable: II Unconditional Global
 $II = (\text{folhas} * 0.0016)$

Variable: Senescencia Conditional
Senescencia =
 $(\text{folha} * 0.010)$ for $t \geq 85$
0 by default

Variable: III Unconditional Global
 $III = \text{folhas}/pe$

Variable: Per_Grao Conditional
Per_Grao =
 $(\text{graos} * 100) / \text{materia_seca}$ for $t = 120$
1 by default

Variable: Per_Caule Conditional
Per_Caule =
 $(\text{caules} * 100) / \text{materia_seca}$ for $t = 120$
1 by default

Variable: Per_Folha Conditional
Per_Folha =
 $(\text{folhas} * 100) / \text{materia_seca}$ for $t = 120$
1 by default

Variable: Per_raiz Conditional
Per_raiz =
 $(\text{raizes} * 100) / \text{materia_seca}$ for $t = 120$
1 by default

Variable: Per_Pal_Esp Conditional
Per_Pal_Esp =
 $(\text{palhas} * 100) / \text{materia_seca}$ for $t = 120$
1 by default

Variable: Reprodutivo Unconditional
 $\text{Reprodutivo} = \text{palhas} + \text{graos}$

Variable: IC Conditional
IC =
 $\text{materia_seca} / \text{graos}$ for $t = 120$
0 by default

Variable: RUE Unconditional
 $\text{RUE} = \text{materia_seca} / (\text{par})$

Variable: sla Unconditional
sla = iaf/folhas

Variable: PeE Unconditional
PeE = 1/sla

Variable: Ra Unconditional
Ra = Radiacao

Lookup: Cultura radi28.dat
Dados relativos a particao e area foliar especifica
t Independent

F_aerea Controlled by t Global

Linear interpolation Repeated

F_raizes Controlled by t Global

Linear interpolation Repeated

F_fls Controlled by t Global

Linear interpolation Repeated

F_cau Controlled by t Global

Linear interpolation Repeated

F_grao Controlled by t Global

Linear interpolation Repeated

PE Controlled by t Global

Linear interpolation Repeated

DF Controlled by t Global

Polynomial interpolation order 2 Repeated

DC Controlled by t Global

Polynomial interpolation order 2 Repeated

DR Controlled by t Global

Polynomial interpolation order 2 Repeated

Lookup: Climaticos meteof.dat

Dados climaticos

t Independent

maxima Controlled by t Global

Linear interpolation Repeated

minima Controlled by t Global

Linear interpolation Repeated

media Controlled by t Global

Linear interpolation Repeated

Radiacao Controlled by t Global

Linear interpolation Repeated