

**Universidade Federal de Santa Catarina**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e**  
**Sistemas**

**Henrique José Souza Coutinho**

**Avaliação da Otimalidade da Produção Resultante de um Sistema Biológico  
Complexo: Uma Aplicação de Algoritmos Genéticos ao Problema de  
Repartição do Fotossintato entre os Componentes das Plantas.**

Esta tese, é parte do requerimento para obtenção do grau de Doutor em Engenharia de  
Produção na Universidade Federal de Santa Catarina.



**Orientador: Edgar A. Lanzer**

**Florianópolis**

**Outubro de 1996**

29/1/97  
g~

# Avaliação da Otimalidade da Produção Resultante de um Sistema Biológico Complexo: Uma Aplicação de Algoritmos Genéticos ao Problema de Repartição do Fotossintato entre os Componentes das Plantas.

Henrique José Souza Coutinho

Esta tese foi julgada e adequada para a obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção e aprovada em sua forma final pelo Programa Pós Graduação de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina.



Ricardo M. Barcia Ph. D.  
Coordenador

Banca examinadora



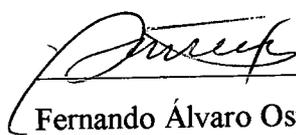
Edgar A. Lanzer Ph. D.  
Orientador



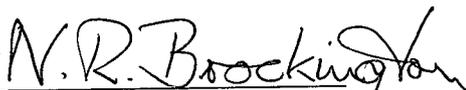
Henry X. Corseuil Ph. D.  
Moderador



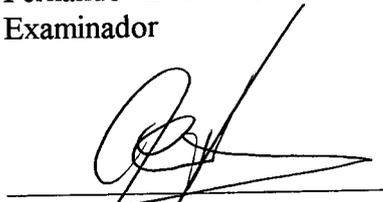
Sadi S. Grimm Ph. D.  
Membro Externo



Fernando Álvaro Ostuni Gauthier Dr  
Examinador



Norman Richard Brokington Ph. D.  
Membro Externo



Oscar-Ciro Lopez Vaca Dr.  
Examinador



Nelson F. Seiffert Dr.  
Membro Externo

Aos meus Pais

Fernando Souza Coutinho, *in memórian*

Clélia Louro Souza Coutinho

## **Agradecimentos**

Novamente, assim como no mestrado, agradeço pela orientação do Prof. Edgar A. Lanzer e também a valiosa contribuição do amigo e colega de curso Aram B. T. Morales, que destinaram horas do precioso "tempo" ajudando a construir este trabalhos. Agradeço também a outros Professores da Pós Graduação de Engenharia de Produção da UFSC e membros da Banca Examinadora como Prof. Brockington.

Aos meus Pais, irmãos e amigos que sempre acreditaram em mim e em minhas idéias.

E finalmente a CAPES, pelo apoio financeiro no Brasil e exterior.

## RESUMO

Nas plantas o particionamento representa como é feita a distribuição da matéria seca entre seus diferentes tecidos. A mudança gradual do particionamento entre os tecidos das plantas durante o seu desenvolvimento é um dos pontos importantes para o estudo da produtividade dos cultivos. Apesar da importância do particionamento ser reconhecida, a fisiologia vegetal ainda continua insegura sobre quais mecanismos o controlam, no entanto existem algumas teorias sobre o tema, ("functional balance" e "sink law concept"). Outros autores demonstram que ocorrem mudanças no particionamento em função das condições ambientais como: disponibilidade de água, luz etc... Tais mudanças são geralmente conhecidas como adaptação ou uma maneira de melhorar a eficiência no uso dos recursos naturais e as vezes como uma resposta compensatória ao ambiente. A partir destas mudanças foram criados modelos teóricos cujo objetivo seria: a maximização da atividade reprodutiva ou a maximização da taxa de crescimento. Embora tais modelos estejam de acordo com a realidade, ainda faltam validações empíricas desta teoria.

O objetivo desta pesquisa foi o de verificar se a produção de um vegetal ao final de uma estação é resultado de uma otimização do controle do particionamento do fotossintato entre os diversos órgãos de uma planta visando maximizar a produção final. Esta avaliação foi feita utilizando um modelo de crescimento e vegetal associado ao algoritmo genético. Os resultados demonstram que a maximização dos frutos/sementes é consistente com dados empíricos.

## ABSTRACT

Partitioning in plants means the distribution of dry matter between the various parts of the plant. The gradual change in the distribution between the different growing points of the plant during its development is one of the most important aspects in the study of plant yield. Although the importance of partitioning is well recognised, the physiological mechanisms which control it remain in doubt, although some theories have been proposed, based on functional balance and the sink law concept. Other authors have shown that changes in partitioning can occur in response to environmental factors such as availability of water and light. Such changes are generally considered as adaptations or as a way of improving the efficiency of the use of natural resources or, sometimes, as compensatory response, theoretical models have been created with objective function of maximizing growth or reproduction. Although such models agree with reality, empirical validation is still lacking.

The aim of this research was to check whether the production of a crop at the end of the season is the result of the optimization of the control of the partitioning of photosynthate between the various organs of the plant with the objective of maximizing that final production. This evaluation was carried out using a model of plant growth associated with a genetic algorithm. The results show that the maximization of fruit/seed production is consistent with empirical data.

## Sumário

<b>Capítulo I - Introdução</b>	1
1.1 Problema e Justificativa	1
1.2 Objetivo	4
1.3 Esboço Metodológico	4
1.4 Estrutura da Tese	5
<b>Capítulo II - Revisão Bibliográfica</b>	6
2.1 Considerações Iniciais	6
2.2.1 Firma X Planta	6
2.2.2 Conceitos de Otimização Aplicados no Particionamento	9
2.2.3 Conceitos de Otimização Aplicados em outros Aspecto do Crescimento	12
<b>Capítulo III - Elaboração do Modelo de Simulação</b>	14
3.1 Considerações Iniciais	14
3.2 Visão Geral dos Modelos de Simulação	15
3.3 Fases Vegetativas e Reprodutivas (Fenologia)	16
3.3.1 Fotossíntese	18
3.3.2 Respiração	22
3.3.3 Particionamento	24
3.3.4 Condições do Ambiente (dados de entrada)	27
3.3.5 Condições Iniciais da Planta (dados de entrada)	27
3.4 Comparação dos modelos ORGYOS e SOYGRO: Validação	28
<b>Capítulo IV - Implementação do Algoritmo Genético (AG)</b>	39
4.1 Considerações Iniciais	39
4.2.1 Considerações Gerais Sobre os AGs	39
4.2.2 Representação de Indivíduos ou Cromossomas.	41
4.2.3 Determinação da função "Fitness	44
4.2.4 Aplicação dos Operadores Genéticos	46
4.3 Resultados Obtidos	48
4.4 Análise dos Resultados	56
<b>Capítulo V - Conclusões e Sugestões</b>	61
5.1 Considerações Inicias	61
5.2 Conclusões e Sugestões	62
5.3 Limitações	68
<b>Referências Bibliográficas</b>	70
Anexo I	76

## Lista de figuras tabelas e gráficos

### Figuras

Figura 1 - Fluxograma básico dos modelos de simulação de crescimento vegetal....	16
Figura 2 - Representação do particionamento.....	23
Figura 3 - Representação do cromossoma com partição relativa.....	42
Figura 4 - Representação do vetor cromossoma.....	44
Figura 5- Representação do AG envolvendo o modelo ORGYOS.....	45
Figura 6: Representação do efeito crossover na reprodução.....	47

### Tabelas

Tabela 1: Comparação do crescimento dos vegetais com teorias da microeconomia.....	6
Tabela 1: Percentagem de fotossintato destinado a folhas, caule e raízes durante a fase vegetativa.....	25
Tabela 2: Custo de produção de Tecidos vegetais da Soja.....	26
Tabela 3: Resultados de produção final de grão do SOYGRO e ORGYOS.....	35
Tabela 4: Coeficientes de Correlação (R) entre trajetórias de Peso Seco das Partes da Planta Soja em três Condições Ambientais.....	37
Tabela 5 Resultados de produção de grãos (Kg/Ha) dos Modelos SOYGRO, ORGYOS e ORGYOS+AG.....	49

### Gráficos

Gráfico 1A - Representação do Parâmetro Comprimento da Noite Estimado para função fototermal	18
Gráfico 1B - Representação do Parâmetro Temperatura média Estimado para função fototermal	18
Gráfico 2: Produção de CH <sub>2</sub> O em função da Radiação Fotossintética Ativa	19

Gráfico 3: Produção relativa em função do Índice de Área Foliar	20
Gráfico 4: Produção relativa em função da Temperatura média diária T	21
Gráfico 5: Produção relativa em função da água disponível no solo em $\text{cm}^3/\text{cm}^3$	21
Gráfico 6: Produção relativa em função da concentração de nitrogênio contida nas folhas	23
Gráfico 7: Acúmulo do peso seco de folhas nos modelos ORGYOS e SOYGRO na condição soja irrigada.....	28
Gráfico 8: Acúmulo do peso seco de caule nos modelos ORGYOS e SOYGRO na condição soja irrigada.....	29
Gráfico 9: Acúmulo do peso seco de raiz nos modelos ORGYOS e SOYGRO na condição soja irrigada.....	29
Gráfico 10: Acúmulo do peso seco de grão nos modelos ORGYOS e SOYGRO na condição soja irrigada.....	30
Gráfico 11: Acúmulo do peso seco de folhas nos modelos SOYGRO e ORGYOS na condição da soja com estresse hídrico.....	31
Gráfico 12: Acúmulo do peso seco de caule nos modelos SOYGRO e ORGYOS na condição da soja com estresse hídrico.....	31
Gráfico 13: Acúmulo do peso seco de raiz nos modelos SOYGRO e ORGYOS na condição da soja com estresse hídrico.....	32
Gráfico 14: Acúmulo do peso seco de grãos nos modelos SOYGRO e ORGYOS na condição da soja com estresse hídrico.....	32
Gráfico 15: Acúmulo de peso seco de folhas nos modelos SOYGRO e ORGYOS na condição da soja normal.....	33
Gráfico 16: Acúmulo de peso seco de caule nos modelos SOYGRO e ORGYOS na condição da soja normal.....	33
Gráfico 17: Acúmulo de peso seco de raiz nos modelos SOYGRO E ORGYOS na condição da soja normal.....	34
Gráfico 18 : Acúmulo de peso seco de grãos nos modelos SOYGRO e ORGYOS na condição da soja normal.....	34
Gráfico 19: SOYGRO, soja na condição irrigado.....	35
Gráfico 20: ORGYOS, soja na condição irrigada.....	36
Gráfico 21: SOYGRO, soja na condição de estresse hídrico.....	36

Gráfico 22: Modelo ORGYOS , soja na condição de estresse hídrico.....	37
Gráfico 23 - Modelo ORGYOS + AG, produção final 3202 Kg Grão/ Ha.....	50
Gráfico 24 - Modelo ORGYOS + AG, produção final 3216 Kg Grão/ Ha.....	50
Gráfico 25 - Modelo ORGYOS + AG, produção final 3027 Kg Grão/ Ha.....	51
Gráfico 26 - Modelo ORGYOS + AG, produção final 2932 Kg Grão/ Ha.....	51
Gráfico 27 - Modelo ORGYOS + AG, produção final 2974 Kg Grão/ Ha.....	51
Gráfico 28 - Modelo ORGYOS + AG, produção final 3004 Kg Grão/ Ha.....	52
Gráfico 29 - Modelo ORGYOS + AG, produção final 1125 Kg Grão/ Ha.....	52
Gráfico 30 - Modelo ORGYOS + AG, produção final 1068 Kg Grão/ Ha.....	53
Gráfico 31 - Modelo ORGYOS + AG, produção final 1104 Kg Grão/ Ha.....	53
Gráfico 32 - Modelo ORGYOS + AG, produção final 1167 Kg Grão/ Ha.....	53
Gráfico 33 - Modelo ORGYOS + AG, produção final 1138 Kg Grão/ Ha.....	54
Gráfico 34 - Modelo ORGYOS + AG, produção final 1091 Kg Grão/ Ha.....	54
Gráfico 35: Comparação do desenvolvimento do grão da soja na condição irrigado entre os modelos ORGYOS e ORGYOS+AG.....	55
Gráfico 36: Comparação do desenvolvimento do grão da soja na condição irrigado entre os modelos SOYGRO e ORGYOS+AG.....	55
Gráfico 37: Comparação do desenvolvimento do grão da soja na condição de estresse hídrico entre os modelos ORGYOS e ORGYOS+AG.....	56
Gráfico 38: Desenvolvimento da biomassa no modelo ORGYOS na condição irrigada.....	58
Gráfico 39: Desenvolvimento da biomassa no modelo ORGYOS na condição de estresse hídrico.....	59
Gráfico 40: Desenvolvimento da biomassa no modelo ORGYOS+AG na condição irrigada.....	59
Gráfico 41: Desenvolvimento da biomassa no modelo ORGYOS+AG na condição de estresse hídrico.....	60

## INTRODUÇÃO

### 1.1 Problema e Justificativa

O estudo do controle da produtividade na agricultura tem utilizado dois instrumentos principais.

O primeiro, e mais antigo, é a função de produção que relaciona o uso de insumos (quantidades empregadas de: fertilizante, água de irrigação, sementes e inseticidas) com o rendimento dos cultivos. Exemplos de aplicações de funções de produção para a otimização da produção agrícola podem ser encontrados em Heady & Dillon (1961) e Dillon & Anderson (1990). Em uma análise mais cuidadosa do processo produtivo, Georgescu-Roegen (1972) e Bogges (1984), demonstraram que as representações convencionais de funções de produção, utilizadas em análises econômicas não são adequadas.

A crítica de Georgescu-Roegen (1972) e Bogges (1984), concentra-se na impossibilidade de, em geral, sintetizar a realidade de processos dinâmicos em representações (modelos) estáticos. Por exemplo: é comum existir uma variação no fluxo de recursos disponíveis (como a água) para o desenvolvimento dos vegetais ao longo do seu ciclo de desenvolvimento. A amplitude da variação no fluxo de vários fatores, ou mesmo a variação de um só fator, pode sem dúvida alterar as previsões efetuadas por funções de produção estáticas, na qual o uso do insumo é expresso apenas como um total acumulado ao longo do ciclo.

O segundo instrumento para o estudo de controle da produtividade agrícola tem sido os modelos de simulação. Tais modelos, em desenvolvimento desde a década de 70, procuram representar a dinâmica do crescimento das plantas cultivadas em função da disponibilidade momentânea de insumos (energia, água, nutrientes). Exemplos de trabalhos ao longo destas linhas incluem como por exemplo: Flinn (1971), Stapleton et Meyers (1971), McKinion et al (1974), Baker et Horrocks (1976), O'Leary et al

(1985), Fishman (1985), Boote et al (1989)\*, Jones et al (1989)\*, Richie et al (1989)\*, Godwin et al. (1989)\*, [\* in: Thornton et al (1991)], Graf (1991).

Segundo Monsi e Murata (1970), um tópico importante dentro dos modelos de simulação é o particionamento do <sup>1</sup>fotossintato entre raízes, folhas, caule e sementes. O particionamento nos modelos hoje disponíveis, em geral, é feito <sup>2</sup>mecanicamente. O termo "mecanicamente" se refere a busca da reprodução do observado no mundo real.

Entretanto, vários autores tem sugerido que o particionamento seria resultante de um processo de otimização [Schulze et al (1983), Iwasa et Roughgarden (1984), Jonhson et Thornely (1987) e Velten et Ritcher (1995)], não existindo porém um acordo sobre o que exatamente estaria sendo otimizado (biomassa, sementes, probabilidade de sobrevivência). Existem evidências que algumas reações da planta à variações do ambiente são consistentes com processos de otimização [Mooney et Gulmon (1982), Bloom et al (1985), Jonhson (1994)]. Tal consistência, ainda que necessária para otimização, não é suficiente para demonstrá-la.

A questão, pois, permanece em aberto; no seu processo de crescimento as plantas particionam o fotossintato de modo a otimizar algum/s objetivo/s?

Esta questão não tem resposta simples, porque os processos fisiológicos vegetais que estão envolvidos na dinâmica do crescimento são complexos e, até certo ponto não totalmente elucidados, principalmente quando tratamos do particionamento. As opiniões sobre o controle no particionamento diferem através de várias abordagens durante os anos, [Davidson (1969), Brouwer (1962, 1977), Zeevaart (1979), Boote (no prelo)].

---

<sup>1</sup> Fotossintato - Considera-se fotossintato ou fotoassimilado o produto da fotossíntese disponível para o crescimento de uma planta. Segundo Monsi et Murata (1970) é a proporção na qual o fotossintato é distribuindo entre os vários órgãos da planta que decide o quanto a planta irá crescer e produzir.

<sup>2</sup> Segundo Brockington (1979), modelos mecanicistas são aqueles onde o grau de análise do sistema é trazido para um grau de detalhamento maior, quando comparado com modelos caixa preta. Este detalhamento sugere que no modelo mecanicista, sejam implementados uma série de pequenas caixas pretas baseadas em regressões, ou regras do tipo "se.....então.....".

Esclarecendo, Brouwer (1962) e Davidson (1969) inicialmente criaram a hipótese conhecida como o "*sink law concept*". Esta hipótese sugere que a força de atração do fotossintato é relativa ao tamanho do órgão vezes sua atividade, onde o órgão é tido como um ralo (sink).

$$\text{Força do ralo} = \text{Tamanho do ralo} \times \text{Atividade do ralo}$$

Em seguida Brouwer (1977) adiciona novas idéias para os mecanismos que determinam o particionamento, entre elas, equilíbrio funcional e controle de hormônios. Mais tarde Zeevaart (1979) questiona sobre a representação do particionamento através de formulas tão simples, já que um órgão se encontra em um estado dinâmico de crescimento. Mais recentemente, Boote (no prelo) sintetiza " A primeira abordagem explicitamente define a força dos vários órgãos (ralo), e em seguida deixa que esses órgãos disputem pela mesma fonte ou reserva. Numa segunda abordagem o particionamento dos assimilados entre os diferentes órgãos é uma função do tempo fisiológico e seus coeficientes são função do estagio fisiológico da planta...". Esta última abordagem será revisada no capítulo seguinte.

Para Evans (1993) "*Our understanding of crop photosynthesis and our capacity to simulate it greatly exceed those for partitioning, yet it is changes in the latter rather than the former that have allowed yield potential to increase..... We remain unsure of their limits, and even of what controls them.*" (pag. 231)

Assim, para saber se o resultado do funcionamento de um sistema ao final de algum tempo é ótimo, ou em outras palavras, se a produção de um vegetal ao final de uma estação é ótima, é necessário especificar o sistema e otimizá-lo. A partir daí, pode-se então comparar o resultado ótimo obtido com o resultado empiricamente observado.

Esta é exatamente a hipótese geral deste trabalho a ser testada. Isto é, verificar se o particionamento observado do fotossintato entre os componentes da planta na realidade é consistente com um processo de otimização. É preciso notar que esta hipótese é subjacente a objetivos de pesquisas anteriores, as quais conforme já observado, foram até o momento insuficientes para alcançar conclusões a nível empírico de produção. Acredita-se que isto decorre da abordagem analítica utilizada nos trabalhos anteriores (controle ótimo,

Pontryagin), possivelmente de alcance limitado para a cobertura do problema da complexidade do particionamento.

Porque o estudo do particionamento do fotossintato é importante? Em síntese, o particionamento do fotossintato é um ponto chave nos modelos de simulação de crescimento de plantas (cereais, tubérculos etc...), e a importância do seu conhecimento reside em aprimorar modelos de simulação que permitam o uso mais eficiente de fertilizantes, irrigação, iluminação artificial, concentração de dióxido de carbono e outros possíveis insumos ou fatores para controlar a produção e a produtividade agrícola.

## 1.2 Objetivo

O objetivo geral deste trabalho é o de verificar se o resultado do funcionamento um sistema de produção complexo, ao final de um tempo determinado, consiste em um resultado otimizado. Mais precisamente pretende-se , verificar se a produção de um vegetal ao final de uma estação é resultado de uma otimização do controle do particionamento do fotossintato entre os diversos órgãos (sub-sistemas) de uma planta visando maximizar a produção final.

## 1.3 Esboço Metodológico

Buscando atingir o objetivo proposto, inicialmente foi desenvolvido um sistema para simular o crescimento (fase vegetativa) e produção (fase reprodutiva) de um vegetal.

Em uma segunda etapa, foi introduzido no sistema desenvolvido um procedimento de busca e otimização (Algoritmo Genético) para a averiguação da proposta inicial.

Outros detalhes da adoção desta metodologia serão esclarecidos no decorrer dos capítulos e três e quatro.

## 1.4 Estrutura da Tese

Este trabalho encontra-se dividido em 5 capítulos.

No primeiro capítulo foi apresentado brevemente o problema do particionamento do fotossintato dentro dos modelos de simulação de crescimento, que é abordado no presente trabalho.

No segundo capítulo, trata-se da revisão bibliográfica. Onde serão apresentados e discutido os principais trabalhos existentes sobre o particionamento otimizado existentes na literatura.

No terceiro, será apresentado a concepção geral dos modelos de simulação de crescimento vegetal e como será elaborado, com algum detalhamento, o modelo que servirá de base para a presente pesquisa. Ao final do capítulo, é apresentada uma análise gráfica, e a validação do modelo construindo.

No quarto será revisada a questão da otimização na teoria de crescimento e produção vegetal e discutida sua inserção dentro do modelo de simulação construído através de Algoritmos Genéticos. São apresentados também resultados obtidos com o modelo de otimização inserido no modelo de simulação, e posteriormente feita uma análise do modelos.

No quinto e último capítulo, apresentam-se as conclusões referentes aos resultados obtidos no trabalho, bem como sugestões para futuras pesquisas na área.

## CAPITULO II

**REVISÃO BIBLIOGRÁFICA****2.1 Considerações Iniciais**

Neste capítulo revisa-se a pouca literatura existente sobre a visão geral de conceitos de otimização aplicados no particionamento e no crescimento vegetal, notando-se que até o momento, a verificação da hipótese apresentada neste trabalho não foi avaliada com mais profundidade. Acredita-se que isto decorra da complexidade do sistema dinâmico em pauta associado a complexidade de ordem fisiológica dos vegetais.

**2.2.1 Firma X Planta.**

Bloom et al (1985), abordam o crescimento dos vegetais relacionando-o com algumas teorias da microeconomia. Este tipo de abordagem faz com que vários pontos, não visualizados por outros autores anteriormente, apareçam assumindo um significado singular para idéias de otimização no crescimento vegetal.

Como exemplos desta relação Bloom et al (1985) citam:

<b>Abordagem</b>	<b>MICROECONOMIA</b>	<b>CRESCIMENTO VEGETAL</b>
<b>Processo</b>	Função necessária em negócios: manufatura, marketing.	Função biológica necessária: crescimento, manutenção ou defesa
<b>Recursos</b>	Mat. prima necessária para o processo: aço, trabalho (grama ou hora)	Materiais do ambiente requeridos pela planta (g de C, N, H <sub>2</sub> O)
<b>Lucro</b>	Entrada menos custo	Ganho líquido de recursos (g de C, N, H <sub>2</sub> O)
<b>Reserva</b>	Recurso estocado internamente	Recurso estocado internamente (g de C, N, H <sub>2</sub> O)
<b>Produto</b>	Bem ou serviço (grama ou hora)	Biomassa (g de C, N, H <sub>2</sub> O)

Tabela 1: Comparação do crescimento dos vegetais com teorias da microeconomia.

Adaptado de Bloom et al (1985)

Nesta concepção planta-economia existem duas complicações [Bloom (1985)]: A primeira é que a moeda, que gira toda teoria econômica, não tem interpretação biológica, pois os recursos encontram-se sem "custo" na natureza. A segunda, está na distinção entre os recursos internos e externos. A aquisição de um recurso, se dá através da absorção pela planta. Uma vez adquirido este passa a ser um recurso interno ou reserva.

Evidenciado esses dois pontos, Bloom et al (1985) apresentam outra relação planta-economia que está associada ao presente trabalho. “ Os economistas assumem que toda firma busca maximizar seus lucros, e que somente a firma que obtém lucro sobrevive. Semelhantemente os ecologistas assumem que a seleção natural tende a maximizar a adaptação do indivíduo que é função de sua produção primária, por que a quantidade e qualidade da resposta produtiva está altamente correlacionada com a produção primária.”

Bloom et al (1985) também apresentam alguns teoremas da economia e sua associação com o desenvolvimento das plantas. Resumidamente pode-se citar:

A firma maximizadora de lucros...

- Adquire um recurso ao preço mais baixo e utiliza quando este tem o maior valor. Sugerindo que as reservas dos vegetais possibilitam um controle de forma a permitir que os vegetais possam adquirir recursos a custo mínimo e usá-los em épocas apropriadas para benefício máximo.
- Busca um nível de saída (produção) para o qual o custo marginal se iguala ao ganho marginal. Sugerindo que as plantas continuam a produzir folhas ou raízes até que o ganho marginal do seu aumento de produção seja igual ao seu custo marginal.
- Na firma maximizadora de lucros os recursos são otimamente alocados entre os processos competidores quando cada recurso limita cada um dos processos no mesmo grau. Ou seja, cada um dos processos em uma planta é limitado pelo mesmo balanço interno de reservas. Economicamente isto é chamado de taxa marginal de substituição técnica. Esta observação tem a Lei do Mínimo<sup>1</sup> como contrária e este raciocínio. Vale a pena lembrar que Bloom et al (1985) citam alguns exemplos de substituição a nível de substâncias e não elementos químicos.

---

<sup>1</sup> Lei do Mínimo - A resposta de um cultivo esta associado ao fator de produção mais limitante.

Resumidamente as teorias apresentadas aqui sugerem, segundo Bloom et al (1985), que “para atingir uma taxa de custo-benefício para cada recurso, e uma alocação ótima entre os processos, as plantas se ajustam fisiologicamente em horizontes curtos (ex: aclimatação) e em horizontes longos (adaptação genética) para minimizar as diferenças entre as taxas de troca (carbono, nutrientes e água) e entre diversos ambientes.”

Bloom et al (1985) acrescentam também que a taxa de troca entre carbono, nutrientes e água geralmente exibe uma variação espacial (*habitat*) e também temporal (durante estações). Para evitar variações extremas nas taxas de troca as parecem equilibrar a oferta e demanda desses recursos. Como? Neste ponto os autores sugerem um mecanismo de controle: “As plantas ajustam a oferta aumentando a alocação interna de reservas para a aquisição de recursos escassos, e ajustando a demanda variando a estocagem do recurso e os padrões de crescimento”. Isto pode ser interpretado como: Alocar reservas para capturar recursos escassos, ou seja, alocar matéria seca para raízes quando o ambiente é escasso em água.

Bloom et al (1985) consideram também que a alocação de reservas no aparato reprodutivo como um investimento de alto risco, principalmente em espécies de vida longa. Isto por que tal aparato é bem menos eficiente em adquirir recursos do ambiente. No entanto, para espécies de vida curta, o retorno deste investimento deve ser rápido, por isso estas espécies investem todas suas reservas na reprodução, diferindo assim das espécies de vida longa.

Por fim as idéias básicas apresentadas por Bloom et al (1985), se cruzam a partir de determinado ponto em relação a este trabalho. Enquanto que Bloom et al (1985) sugerem que a seleção natural tende a maximizar a adaptação do indivíduo que é função da produção primária de biomassa e/ou reservas, a presente trabalho busca verificar se o particionamento otimizado torna possível a maximização da produção (sementes viáveis= produto) atingindo maiores possibilidades de sobrevivência.

## 2.2.2 Conceitos de Otimização aplicados no particionamento

Pode-se dizer que o conceito da otimização do particionamento do fotossintato tem sido pouco explorado nos últimos anos. No primeiro trabalho onde se utiliza esta idéia, Schulze et al (1983) modelam o período vegetativo da *Vigna unguiculata* (L) com sucesso. Neste trabalho Schulze et al (1983) aplicaram o princípio da maximização de Pontryagin, modelando o crescimento em condições ótimas de nutrição, e posteriormente variando a disponibilidade de água assim como a umidade do ar.

Suscitadamente o modelo formal descreve o particionamento entre copa e raiz (shoot/root) através da manutenção do conteúdo de água no interior da planta. Em outras palavras, partindo de uma estrutura inicial de copa/raiz, a planta busca primeiramente atingir um ponto de equilíbrio (meta) entre a quantidade de raiz e copa em um tempo  $t^*$  (mínimo). Este equilíbrio representa uma quantidade de raiz que pode absorver maior ou necessária, para manter a quantidade de água no interior da planta maior ou igual a um nível aceitável. Por outro lado, como outra restrição, a copa só pode evaporar uma quantidade de água menor ou igual a quantidade de água absorvida pelas raízes. Assim sendo, em função das condições ambientais consideradas (umidade do ar e solo), o sistema busca um controle do particionamento entre copa e raízes, procurando maximizar a quantidade de matéria seca produzida ao final do período vegetativo. Assim o resultado obtido deste modelo é a otimização do acúmulo de biomassa. O modelo de Schulze et al (1983) mostrou direções de reações no particionamento em função de variações na disponibilidade de água semelhantes a observada experimentalmente em *Vigna unguiculata* (L). Entretanto a simples semelhança na direção destas reações é insuficiente para provar um comportamento otimizado da *Vigna unguiculata* (L) na produção de sementes

Na mesma época Iwasa et Roughgarden (1984), trabalharam em um modelo um pouco mais complexo. Iwasa et Roughgarden (1984) utilizaram também o princípio de máximo de Pontryagin na modelagem do problema da alocação de carboidrato para o crescimento ótimo em níveis teóricos sem uma validação empírica. Iwasa et Roughgarden (1984) desenvolveram este modelo até a fase reprodutiva considerando a dependência da taxa copa/raiz, disponibilidades de água e luz, e ainda reações da planta após podas e/ou

mudanças ambientais. O conceito de otimização aplicado em Iwasa et Roughgarden (1984) consiste em “definir o valor marginal que cada tecido da planta possui em vários pontos do tempo durante a estação (ou cultivo) ...”. Esta foi a justificativa intuitiva utilizado por Iwasa et Roughgarden (1984) par utilizar o princípio de maximização de Pontryagin. Como função objetivo, “atingir o padrão ótimo de crescimento o qual maximiza a atividade reprodutiva total”, ou seja, maximizar a produção de sementes. Entretanto Iwasa et Roughgarden (1984) não foram além da formalização a análise matemática do modelo de crescimento.

Johnson et Thornley (1987), desenvolveram através da equação do balanço funcional (massa de raízes X atividade específica das raízes = massa da copa X atividade específica da copa ) um sistema de equações diferenciais otimizando a partição para atingir o maior acúmulo de matéria seca na fase vegetativa. O principal problema apontado por Johnson et Thornley (1987) na equação anterior (balanço funcional) foi que: esta seria verdadeira se a relação carbono:nitrogênio se mantivesse constante, assim esta poderia ser utilizada como ponto de partida para desenvolver um sistema de partição dinâmico. Johnson et Thornley (1987) propõem basicamente que a partir do conhecimento das atividades específicas da raiz e da copa, e conhecendo-se as concentrações de carbono e nitrogênio na planta, a partição ocorre de forma a balancear a equação apresentada, modificando a massa da raiz ou copa. Isto significa dizer que a partição é controlada por fatores internos da planta (concentração interna de N e C), que pode-se considerar que é fisiologicamente correto.

No entanto segundo Johnson et Thornley (1987), “ Parece ser plausível que qualquer mecanismo de controle para a partição tenha emergido da pressão evolucionaria de seleção, que deveria pelo menos maximizar a taxa de crescimento específico”. No entanto o “sistema planta” é influenciado pelo sistema condições ambientais que acabam por controlar a dinâmica do crescimento.

Uma crítica que pode-se fazer sobre o trabalho de Johnson et Thornley (1987) é que geralmente a água tem um papel importante neste sistemas, mas no entanto não é mencionada. Também o trabalho de Johnson et Thornley (1987) não foi além da

formulação e análise do modelo matemático desenvolvido. Isto é, não foi feita uma validação empírica do modelo de otimização.

Mais recentemente, Velten et Ritcher (1995) voltaram a trabalhar no tema já que algumas simplificações foram utilizadas pelos autores anteriores. Quanto ao trabalho de Schulze et al (1983), Velten et Ritcher (1995) introduziram uma nova relação não linear entre a absorção de água e a biomassa de raiz, pois anteriormente esta era utilizada como uma relação linear. No entanto esta modificação ainda não foi testada para os dados (*Vigna unguiculata* (L)) de Schulze et al (1983). Nas palavras de Velten et Ritcher (1995) “Claro que a taxa de absorção de água ( $w$ ) não é linear em relação a biomassa de raiz ( $R$ ) em condições naturais. Existe uma proporção de biomassa de raízes que não está envolvida no processo de absorção de água que promove o crescimento (veja em qualquer livro texto de botânica). Como consequência disso, a taxa de absorção ( $w'$ ) diminui com o aumento de ( $R$ )”.

Outro aspecto relevante nos aprimoramentos de Velten et Ritcher (1995) foi a comparação entre as seguintes hipóteses (função objetivo) de maximização: a utilização do critério de maximização de frutos não é alterada quando comparada com o critério de maximização de biomassa total. Isto significa dizer que o caminho ótimo para produção de frutos forçosamente passa pelo caminho ótimo para produção no período vegetativo, confirmando "crescer melhor para produzir melhor". Esta verificação foi explicada como sendo os frutos uma forma alternativa de biomassa, sua maximização está contida na função objetivo maximizar a biomassa. Finalizando, observa-se que o trabalho de Velten et Ritcher (1995) também é teórico, ainda sem validação empírica.

Ainda outros autores aplicaram alguns conceitos de otimização no desenvolvimento geral das plantas. No próximo tópico serão apresentados outras abordagens sobre a otimização X plantas.

### 2.2.3 Conceitos de Otimização Aplicados em outros Aspectos do Crescimento Vegetal.

Considerando componentes intrínsecos do vegetal em relação a fotossíntese, Mooney et Gulmon (1982) apresentaram como a principal restrição na capacidade fotossintética dos vegetais a concentração da enzima RUBISCO (ribulose bifosfato carboxilase) nas folhas. Segundo Mooney et Gulmon (1982), a concentração desta enzima é modulada nas folhas para se igualar ao fator mais limitante no seu ambiente.

Jonhson (1994) também sugere tal mecanismos de adaptação da fotossíntese pela planta. Este mecanismo é feito através do ajuste do nível de enzimas na folha em função das condições ambientais, e o ajuste fica caracterizado como sendo uma de estratégia otimização para a fotossíntese e conseqüentemente o crescimento . Mais recentemente Hikosaka et Terashima (1995) também afirmam que sob condições de deficiências de nitrogênio, processos de partição do nitrogênio a nível de enzimas e proteínas são alterados, permitindo um uso mais eficiente do nitrogênio. Esta eficiência tem o significado adaptativo em função da disponibilidade de nitrogênio, e na posteriormente na fotossíntese.

Sequera (1994), utiliza Algoritmos Genéticos para parametrização de modelos de fotossíntese, demonstrando a importância e qualidade de resultado quando se insere em modelos mecânicos a capacidade de uma auto correção ao se abordar um novo ambiente. Segundo Curry et Felman, (1987) (in: Sequera et al (1994)) os "modelos de simulação usados na agricultura consistem de sistemas de equações diferenciais e suas respostas aos fatores que o dirigem. Esses modelos necessitam de parametrização ou recalibração para atender as diferenças entre as espécies e variedades, e também para atender com as diferentes condições ambientais. A recalibração fisiológica detalhada de um modelo é cara e consome tempo...".

Orians et Solbrig (1977), apresentaram o conceito geral da fisiologia vegetal onde a água toma parte dos principais mecanismos desenvolvidos pelas plantas na natureza. Isto é, existe uma "inevitável associação entre a perda de água e a entrada do dióxido de carbono pelos estômatos..." . A este conceito, Orians et Solbrig (1977) adicionaram as

modificações que ocorrem no ambiente e na morfologia celular, resultando nos diferentes tipos de vegetais adaptados as condições mais complexas de temperatura, e disponibilidade de água. Sobre este ponto de vista de adaptação, Orians et Solbrig (1977) descrevem diferenças entre pontos morfológicos das plantas, que lhes atribuem o maior ganho fotossintético líquido no seu ambiente específico. Como base neste raciocínio Orians et Solbrig (1977) consideraram:

“Qualquer modelo de seleção natural assume “metas” a serem otimizadas (ou maximizadas), e restrições com as quais os organismos devem operar. Uma meta razoavelmente pequena para as plantas seria a **maximização da taxa fotossintética**; uma planta capaz de aumentar sua fotossíntese considerando as restrições dos recursos disponíveis e ambiente físico, deve ter vantagens na competição com outras plantas, na defesa contra herbívoros, e também deve ter mais energia devotada a reprodução”.

A fotossíntese de uma copa é a soma da fotossíntese das folhas e suas diferentes capacidades em função da idade e teores de nitrogênio, que por sua vez depende do arranjo das folhas na copa que cria efeitos de atenuação da luz. Assim disponibilidade de luz, decresce com a profundidade na copa Percy (1990) [in: Wu (1993)], e também no arranjo espacial das folhas [Terashima et Inouye (1985), In: Wu (1993)]. Wu (1993), apresenta um modelo teórico para avaliar o ideotipo em cultivos florestais com respeito ao arranjo físico do aparato fotossintético (copa), para obtenção do maximização da fixação de carbono.

Resumindo os trabalhos de Johnson et Thornley (1987), Velten et Ritcher (1995) são modelos matemáticos e teóricos, ainda sem validação com dados empíricos do modelo da otimização no particionamento. Enquanto que Orians et Solbrig (1977), Mooney et Gulmon (1982), Percy (1990), Jonhson (1994), apesar de abordarem conceitos de otimização no desenvolvimento das plantas, não são aplicados nos particionamento.

## ELABORAÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO

### 3.1 Considerações Iniciais

Inicialmente para a execução deste trabalho será necessário obter um sistema dinâmico que represente o crescimento e produção de uma planta, para posteriormente, sobre este sistema aplicar um procedimento de otimização.

O "software" conhecido como DSSAT [Decision Support System for Agrotechnology Transfer; Tsuji, Uehara e Balas (1994)] é tido como sendo um dos mais atualizados na área de simulação de cultivos. Este pacote contempla a simulação de vários cultivos como milho, trigo, sorgo, arroz, amendoim, soja, e outros. Entre os cultivos apresentados no DSSAT, a soja foi escolhida como base para o estudo que segue no presente trabalho em virtude do grande número de publicações disponíveis e do sistema SOYGRO contido no DSSAT. O sistema SOYGRO simula o crescimento da soja em condições ambientais variadas.

Idealmente seria utilizado o próprio sistema SOYGRO na pesquisa como o sistema sobre o qual se poderia interferir nos coeficientes de partição. No entanto este é um sistema comercial fechado. Por outro lado, grande parte das componentes utilizadas na construção do SOYGRO se encontram na literatura. Assim decidiu-se reunir estes componentes construindo-se um modelo de simulação capaz de emular o SOYGRO, para posteriormente testar a hipótese de otimização que é o núcleo do trabalho.

No restante do capítulo são discutidas as componentes do modelo de simulação ORGYOS construído com base no modelo SOYGRO para o propósito desta pesquisa.

### 3.2 Visão Geral dos modelos de Simulação

Matematicamente o modelo da soja SOYGRO e outros são apresentados da seguinte forma (segundo Wilkerson et al (1983)): A taxa total de mudança em matéria seca é  $W$  em gramas /m<sup>2</sup> é descrita através de:

$$dW / dt = W^+ - S_L - S_S - S_R$$

onde  $S_L$ ,  $S_S$  e  $S_R$  representam a senescencia das partes folhas (L), caule (S) e raiz (R) e

$$W^+ = E \cdot (Pg - Rm)$$

Onde o novo crescimento, de  $W^+$  é função da fotossíntese  $Pg$ , respiração de manutenção  $Rm$ , e das taxas de eficiência de conversão  $E$  do fotossintato nos diferentes tecidos vegetais.

A mudança de peso dos vários tecidos é dada por:

$$dW_L / dt = X_L W^+ - S_L - M_L$$

$$dW_S / dt = X_S W^+ - S_S - M_S$$

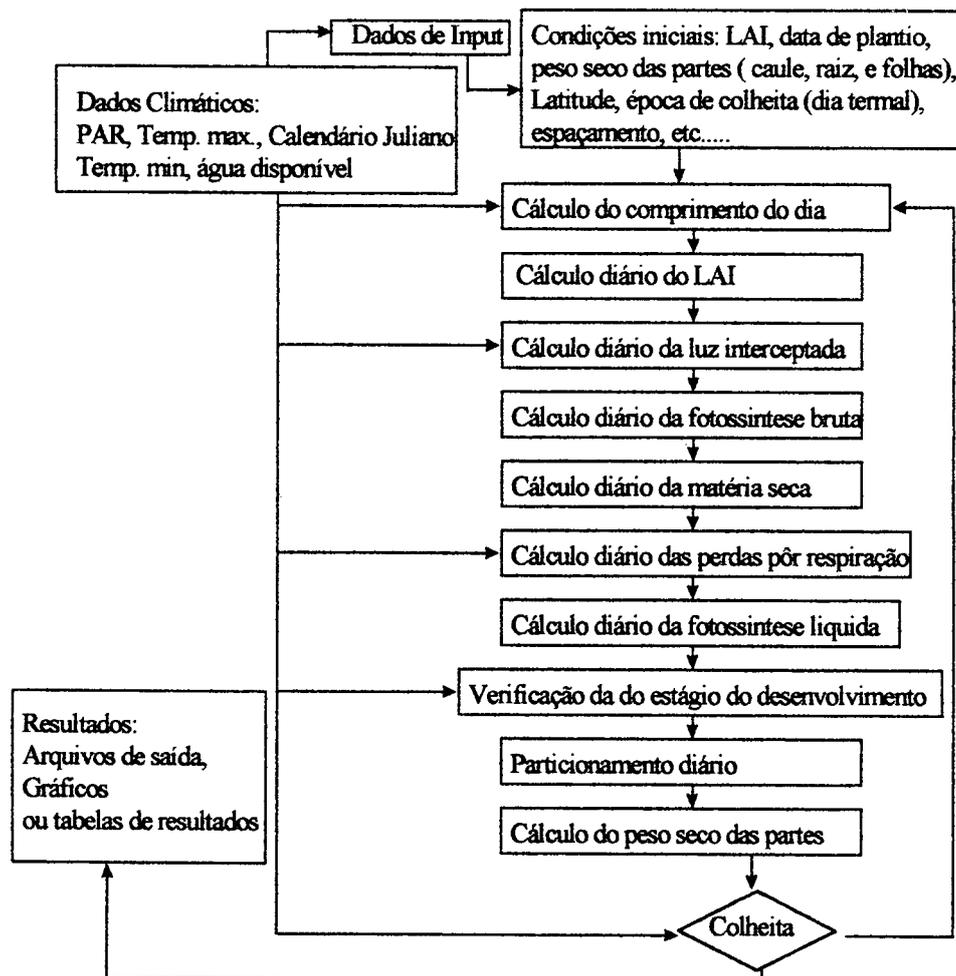
$$dW_R / dt = X_R W^+ - S_R - M_R$$

$$dW_{SH} / dt = X_{SH} W^+ - S_{SH} - M_{SH}$$

$$dW_{SD} / dt = X_{SD} W^+ - a (M_L + M_S + M_R + M_{SH})$$

Onde os subscritos L, S e R são como antes, SH é a casca da vagem e SD são as sementes (grãos),  $X_j$  é a fração (partição) do fotossintato destinado ao componente  $j$  ( $j = L, S, R, SH, SD$ ),  $S_j$  é a fração perdida na senescencia e  $M_j$  são proteínas mobilizadas.

Sob o ponto de vista geral, os modelos de simulação são desenvolvidos seguindo o Fluxograma (1) ilustrado na figura 1. Inicialmente um modelo de simulação parte de uma condição inicial do cultivo (planta), e é alimentado diariamente pelos dados do ambiente. A partir desta estrutura inicial, efetuam-se cálculos diários referentes a: captação de luz, fotossíntese, respiração, estágio fenológico da planta e particionamento. De acordo com o estágio fenológico da planta, os coeficientes do particionamento se alteram proporcionando desde o crescimento das partes vegetativas até a fase final da produção, propriamente dita (frutos ou sementes).



Fluxograma (1), fonte: adaptado de O'Callaghan (1994)

Figura 1: Fluxograma básico dos modelos de simulação de crescimento vegetal

Como mencionado anteriormente, para fins deste trabalho, reuniu-se componentes do modelo de simulação SOYGRO com o objetivo construir um modelo de comportamento semelhante a fim de testar a hipótese de otimização. Assim os tópicos apresentados a seguir foram utilizados para construção do modelo de simulação "ORGYOS" emulando o SOYGRO.

### 3.3 Fases Vegetativas e Reprodutivas (Fenologia)

Durante o seu ciclo, a soja possui distintas fases que são diferenciadas em função da morfologia de seus órgãos vegetativos (folhas, nós e cotilédones) ou reprodutivos (flores, legumes, grão e cor do grão). Do ponto de vista do cultivo da soja, decisões importantes dependem do estágio em que a planta se encontra. Por outro lado a nível de

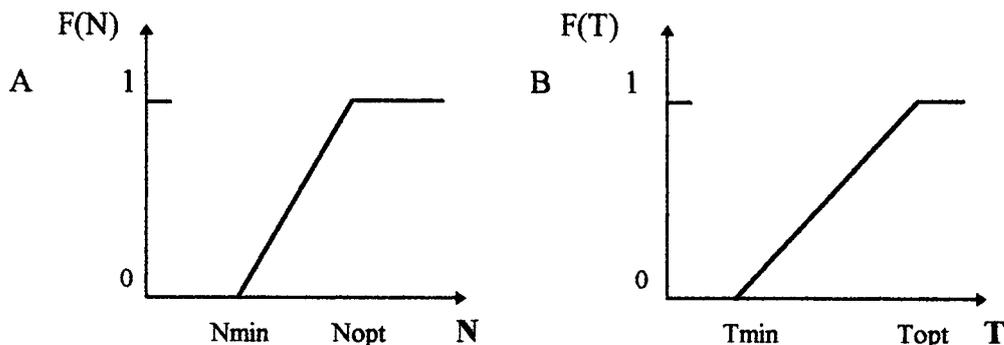
modelos, a determinação dos estágios é importante pois deve existir uma boa correlação entre os modelos e a realidade, como por exemplo: a época de floração e maturação do grão são elementos fundamentais para o cultivo, pois deve haver um sincronismo entre os estágios vegetativo e reprodutivo e as condições climáticas para se obter um bom rendimento. Segundo Jones et Laing (1978), esta previsão tem o importante papel de alterar os *coeficientes de particionamento*, que em outras palavras, significa mudanças na distribuição do fotossintato. Essas mudanças desencadeiam a formação das flores e frutos.

O fotoperíodo e a temperatura são os principais fatores reconhecidos que contribuem para o controle da fenologia da soja Jones et Laing (1978), Wilkerson et al (1983) Grimm et al (1993, 1994). Também existem fatores que são ligados a variedade ou cultivar da soja, resultando em uma resposta diferenciada a estes fatores. Jones et Laing (1978) revisaram o tema e apresentam alguns modelos para a previsão de algumas fases mais importantes da soja. Na sua conclusão ficou sintetizado que os efeitos da temperatura são notadamente fortes porém com fortes interações com o fotoperíodo.

Mais recentemente Grimm et al (1993) avançaram as pesquisas para obtenção de estimativas de parâmetros para prever datas de florescimento em alguns cultivares de soja, e em seguida Grimm et al (1994) na previsão da ocorrência dos estágios reprodutivos após a floração. Estes dois trabalhos servem como suporte para o modelo SOYGRO utilizado atualmente. Sua principal contribuição verifica-se na utilização do conceito fototermal tendo como base uma função que integra os fatores temperatura e comprimento da noite, representando uma unidade denominada dia termal representando o dia fisiológico. Basicamente o conceito engloba a interação de duas funções lineares com platô (vide a representação no gráfico 1).

$$R(t) = F(N) * F(T)$$

Onde  $R(t)$  é a taxa de desenvolvimento no dia fototermal  $t$ ,  $F(N)$  é a função do comprimento da noite  $N$  e  $F(T)$  é função da temperatura  $T$ . Tanto  $F(N)$  e  $F(T)$  estão contidas no intervalo  $[0,1]$ . Assim quando  $F(N)$  e  $F(T)$  são iguais a 1, significa que o desenvolvimento reprodutivo se processa em sua maior taxa.



Gráficos 1 A e B: Representação dos parâmetros (A) Comprimento da Noite e (B) Temperatura média, estimados para função fotothermal

$$R(t) = F(N) * F(T)$$

$T_{min}$  = temperatura em °C abaixo da qual não ocorre desenvolvimento para floração.

$T_{opt}$  = temperatura em °C acima da qual ocorre desenvolvimento máximo para floração

( nota: existem limites superiores)

$N_{min}$  = comprimento da noite abaixo do qual não ocorre desenvolvimento para floração, em horas.

$N_{opt}$  = comprimento da noite acima do qual ocorre desenvolvimento máximo para floração, em horas.

( $T_{min} = 8.70$ ,  $T_{opt} = 26.73$ ,  $N_{min} = 2.44$ ,  $N_{opt} = 11.25$ , para variedade Bragg.)

No modelo ORGYOS, serão utilizados estes conceitos para verificação do estágio da planta em função das condições ambientais (temperatura e comprimento da noite), e assim suas datas previstas servem como sinais para a alteração do particionamento do fotossintato no modelo ORGYOS. A título de comentário, em Grimm et al (1993 e 1994), foram analisadas formulações alternativas para o cálculo de  $R(t)$ , não sendo encontradas diferenças entre os resultados nos métodos analisados.

### 3.3.1 Fotossíntese

O papel da fotossíntese em um sistema para modelar o desenvolvimento de um vegetal tem a importância de gerar a fonte que alimentará o crescimento. A fotossíntese sofre interações de vários fatores do ambiente como: luz, temperatura, dióxido de carbono, água e nutrição mineral, Leopold Kriedemann (1975). Wilkerson et al (1983) apresentaram um modelo multiplicativo para fotossíntese no SOYGRO, utilizando alguns dos fatores relevantes para soja, estes são:

$$P_G = k_p \cdot P_G^{\max} \cdot f_L \cdot f_\theta \cdot f_T \cdot f_N$$

Onde:

$P_G$  : fotossíntese bruta em g de  $CH_2O/m^2$ /dia

$k_p$  : fator de estimativa de erro de medidas de fotossíntese durante o desenvolvimento das plantas.

$f_L$  : é um coeficiente contido entre zero e um e que depende do Índice de Área Foliar (LAI "Leaf Area Index",  $m^2$  folhas/ $m^2$  solo) representado por L.

$f_\theta$  : é um coeficiente contido entre zero e um e que depende da quantidade de água disponível no solo ( $\theta$ )  $cm^3$  água/ $cm^3$  solo.

$f_T$  : é um coeficiente contido entre zero e um e que depende da temperatura média diária (T) em graus Celsius.

$f_N$  : é um coeficiente entre zero e um que depende da concentração percentual de nitrogênio na folha.

A seguir a equação e seus componentes serão discutidas em maior detalhe.

Wilkerson et al (1983) utilizaram a taxa fotossintética com função multiplicativa do trabalho de Holt et al (1975) In: Wilkerson et al (1983). O componente de maior peso nesta representação da taxa de fotossíntese é função da radiação solar (PAR, "Photosynthetic Active Radiation") para os valores ótimos de área foliar, água disponível no solo, temperatura e concentração de nitrogênio foliar.

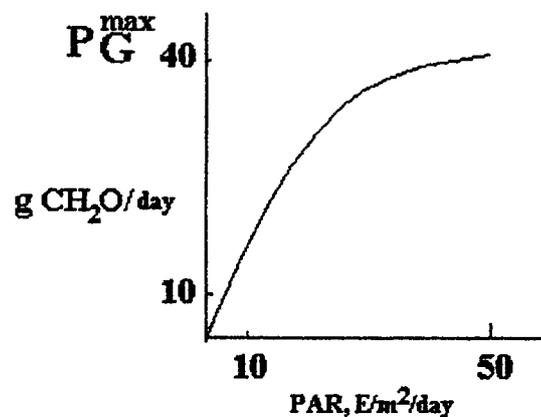


Gráfico 2 Produção de  $CH_2O$  em função da Radiação Fotossintética Ativa (PAR Photosynthetic Active Radiation). Fonte: Wilkerson et al, (1983).

Onde:

$P_G^{\max}$  - Taxa máxima de produção de  $CH_2O$  para uma copa cheia e uma dada quantidade de radiação,  $g/m^2/dia$ .

$$P_G^{\max} = \begin{cases} 1.67 PAR - 0.0173 PAR^2 & 0 \leq PAR \leq 48.27 \\ 40.3 & 48.27 \leq PAR \end{cases}$$

A atividade da área foliar é descrita através do Índice de Área Foliar (L), que representa  $m^2$  de folha /  $m^2$  de solo. Admite-se que para L maior que 1 inicia-se um auto sombreamento, o qual por sua vez prejudica a própria fotossíntese.

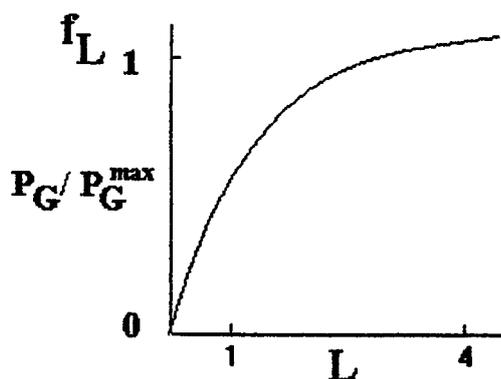


Gráfico 3: Produção relativa em função do Índice de Área Foliar (LAI "Leaf Area Index = L)

Fonte: Wilkerson et al, (1983).

$$f_L = \begin{cases} 0.0 & L < 0.102 \\ (5.4 + 47.78L - 6.23L^2) / 100 & 0.102 \leq L \leq 3.835 \\ (1 - e^{-0.9144L}) & 3.835 < L \end{cases}$$

A temperatura tem um importante papel nas reações químicas. No caso da soja, temperaturas abaixo de  $13\text{ }^\circ\text{C}$  não permitem uma produção fotossintética segundo o trabalho de Wilkerson et al (1983). Por outro lado temperaturas acima de  $27\text{ }^\circ\text{C}$  são bastantes favoráveis. Note as diferentes temperaturas mínima para o dia termal  $T_{\min} = 8.7\text{ }^\circ\text{C}$  e a temperatura de  $13\text{ }^\circ\text{C}$  utilizada nesta função (Gráfico 1 B).

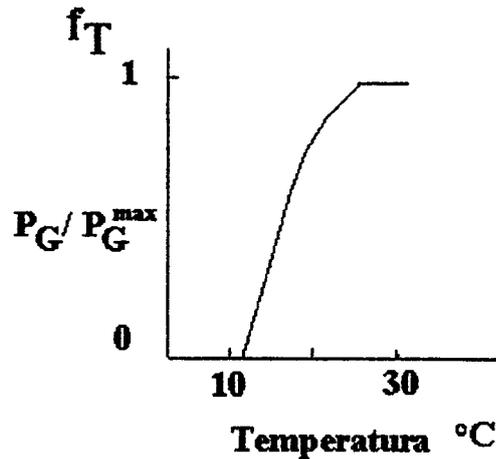


Gráfico 4: Produção relativa em função da Temperatura média diária T.

Fonte: Wilkerson et al, (1983).

$$f_T = \begin{cases} 0.0 & T_D < 13 \\ \ln[(T_D - 5)/8] & 13 \leq T_D \leq 27 \\ 1.0 & 27 < T_D \end{cases}$$

A fotossíntese em função da água do solo no trabalho de Wilkerson et al (1983) foi desenvolvida especialmente para solos de areia fina em Arredondo (USA). O modelo utilizado foi de Zur et Jones (1981) e os dados de Jones (1979) in: Wilkerson et al (1983).

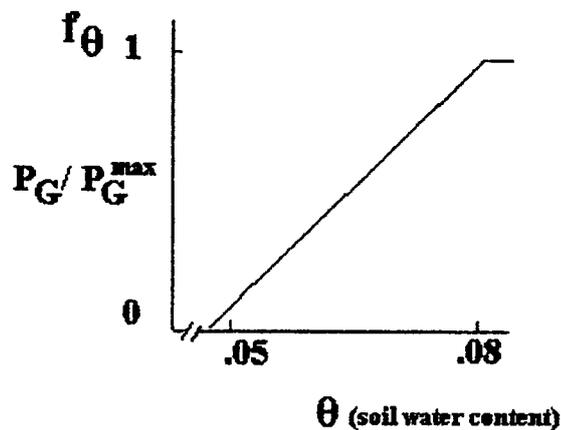


Gráfico 5: Produção relativa em função da água disponível no solo em  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$

Fonte: Wilkerson et al, (1983).

$$f_\theta = \begin{cases} 0.0 & \theta < 0.045 \\ -1.98 + 26.685\theta & 0.045 \leq \theta \leq 0.082 \\ 1.0 & 0.082 < \theta \end{cases}$$

Em Wilkerson et al (1983), a concentração de nitrogênio nas folhas foi mais um parâmetro utilizado para medir a fotossíntese na soja. Esta concentração de nitrogênio indica por sua vez quantidades de cloroplastos e enzimas que atuam ativamente na fotossíntese. No presente trabalho não consideraremos o nitrogênio como um fator limitante para o cultivo. Pois se o nitrogênio fosse considerado como um insumo (externo) para a soja, sua disponibilidade seria analisada a nível de solo e não no interior das folhas, dado este não apresentado nas condições do ambiente do modelo SOYGRO.

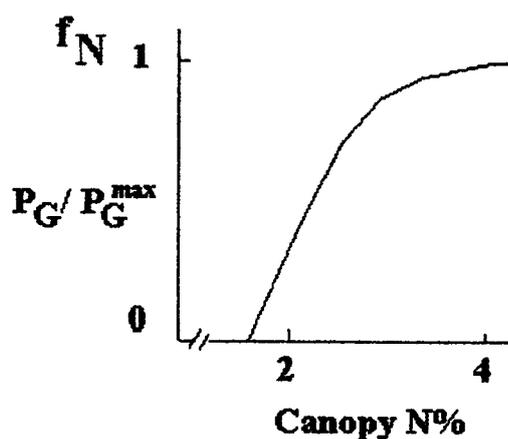


Gráfico 6: Produção relativa em função da concentração de nitrogênio contida nas folhas .

Fonte: Wilkerson et al, (1983).

$$f_N = (- 55.12 + 39.04N_L - 4.25 N_L^2) / 34.48$$

onde  $N_L$  = nitrogênio foliar

### 3.3.2 Respiração

A respiração nos vegetais em geral é dividida em dois tipos de processos que ocorrem simultaneamente. De acordo com van Keulen et Wolf (1986) os açúcares produzidos durante o processo de assimilação (“fotossíntese”) é convertido em matéria seca estrutural, ou pode ser acumulado temporariamente sob a forma de reservas, que podem ser utilizadas como fonte de energia. As plantas necessitam de energia para dois processos, o primeiro seria para a manutenção do gradiente de ions e ressíntese de estruturas degradadas (proteínas); o segundo para conversão do fotossintato na parte estrutural da planta, isto é, raízes, caules, folhas etc.... Nos dois processos mencionados o

CO<sub>2</sub> é produzido e liberado, e portanto são considerados como processos respiratórios. O primeiro é chamado de respiração de manutenção e o segundo respiração de crescimento.

A Figura 2 representa simplificada o que ocorre com o fotossintato durante o desenvolvimento da planta na fase vegetativa.

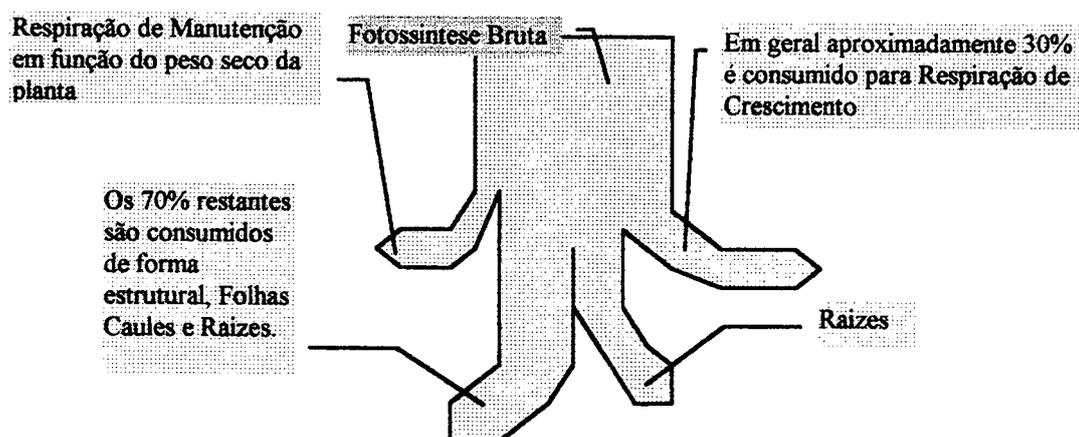


Figura 2: representação do particionamento. (Adaptado de Penning de Vries and van Laar (1982))

A respiração no modelo ORGYOS será representada segundo Penning de Vries et van Laar (1982): A respiração é definida a partir do peso seco dos diferentes tecidos ou órgãos como representado na fórmula:

$$R_{\text{main}} = 0,03 \text{ Folhas} + 0,015 \text{ Caule} + 0,01 \text{ Raízes} + 0,01 \text{ Reservas}$$

$R_{\text{main}}$  - respiração de manutenção.

Esta representação da respiração por sua vez é mais simples que a utilizada por Wilkerson et al (1983), onde a temperatura interage com os custo da respiração.

Segundo Wilkerson et al (1983),

$$R_m = R_o * WC + R_a * PG$$

$$R_o = 0,0005(1,056 + 0,0456T + 0,024T^2)$$

$$R_a = 0,0029(1,056 + 0,0456T + 0,024T^2)$$

Onde :  $R_m$  - respiração:

$WC$  - peso seco de copa por unidade de área -  $g/m^2$  (Weight Canopy)

$PG$  - fotossíntese Bruta  $g\ CH_2O/m^2$

$R_a$  -  $g\ CH_2O/m^2$  requeridas na respiração de manutenção para ressíntese de proteínas por grama de fotossintato por dia.

$R_o$  -  $g\ CH_2O/m^2$  requeridas para manutenção das paredes celulares e gradiente de ions por g de peso seco por dia.

$T$  - temperatura media em  $^{\circ}C$ .

### 3.3.3 Particionamento

O particionamento em vários modelos de simulação de crescimento vegetal é tido como uma das chaves na representação deste processo. As mudanças nos coeficientes de partição são dadas por “sinais”, que no caso particular da soja é dada pela soma do dia fototermal. Estas alterações nos coeficientes de partição se traduzem também nas mudanças entre os estágios fenológicos do cultivo.

Conforme Wilkerson et al (1983) foram utilizados inicialmente coeficientes calculados experimentalmente por Hanway et Weber (1971) e Paul and Kuley (1981). Estes coeficientes eram: na fase vegetativa 0.29 para folhas, 0.24 para caules e 0.47 para raízes. Da fase reprodutiva  $R_2$  para  $R_4$  (formação de vagens) os coeficientes se alteram linearmente de 0.29 para 0.18, 0.24 para 0.72 e 0.47 para 0.10 respectivamente. Na fase seguinte  $R_5$  (início do enchimento dos grãos), marcada no modelo de Wilkerson et al (1983) como ENDSET (ponto no tempo o qual não pode mais serem agregados novas vagens), o particionamento é 100% destinado ao enchimento dos grãos.

Atualmente estes coeficientes encontram-se modificados, segundo os dados apresentados na Tabela 1.

Outro ponto a ser considerado na modelagem do crescimento vegetal é a eficiência de conversão da glucose ou carboidratos (produto da fotossíntese), nos diferentes tipos de tecido do vegetal. Para soja esta eficiência de conversão é apresentada segundo os dados

calculados por Hanway and Werber (1971) (In: Wilkerson et al (1983)) e apresentados na Tabela 2.

Tabela 1: Percentagem de fotossintato destinado a folhas, caule e raízes durante a fase vegetativa

Estágio Vegetativo	Folha	Caule	Raiz
0.0	0.43	0.09	0.48
1.5	0.43	0.13	0.44
3.3	0.40	0.23	0.37
5.0	0.35	0.30	0.35
7.8	0.34	0.36	0.30
10.5	0.31	0.51	0.18
30.0	0.31	0.51	0.18

Fonte: Boote (1993)

Observação: Na fase reprodutiva 100% do fotossintato é destinado aos grãos.

Como ponto de partida o modelo ORGYOS, construído no presente trabalho, foi baseado nos principais pontos apresentados (fotossíntese, respiração e particionamento de acordo com o estágio fenológico). Outro ponto importante para os modelos de simulação de cultivos ainda é o efeito da senescencia que no modelo ORGYOS foi representada em função da idade, peso das partes da planta, e estresse hídrico. Além do efeito da senescencia, foi também implementado uma função de "retardo", sugerindo que nem todo fotoassimilado do dia  $i$  está prontamente disponível para ser incorporado na estrutura do vegetal no mesmo dia  $i$ .

Por fim, foi considerado que um percentual pequeno (menor que 0.01% a nível diário) do peso dos tecidos (folhas e caule) é tido com um fonte de reserva para produção do fruto. Segundo Yamagata, Kouche et Yoneyma (1987), aproximadamente 23% do carbono existente no grão da soja é proveniente da remobilização do carbono de reservas localizadas principalmente no caule, pecíolo e folhas (os outros 77% são provenientes da fotossíntese).

Tabela 2: Custo de produção de Tecidos vegetais da Soja

Tecidos	Custo de Produção gCH <sub>2</sub> O/g produto (CH <sub>2</sub> O requerido para produzir 1g de tecido)	Peso seco de tecido produzido por g CH <sub>2</sub> O
Folhas	1.51	0.66
Caule	1.40	0.71
Casca da vagem	1.46	0.68
Sementes	2.01	0.50
Raízes	1.27	0.88

Fonte: adaptado de Wilkerson et al (1983).

Ainda existem nos modelos de simulação o balanço de outros elementos dentro da planta como: proteínas, lipídeos e minerais, e também a parte referente ao balanço hídrico na planta (evapotranspiração) que não foram consideradas neste trabalho. Óbvio que a inserção destes e outros detalhes levariam um modelo mais aproximado da realidade; entretanto a disponibilidade deste material na bibliografia (referente ao SOYGRO) é escassa, e ainda o tempo para sua elaboração completa seria excessivo. O principal fato considerado para construção do ORGYOS, foi o esqueleto da planta que é 90 a 80% formado carboidrato produto da fotossíntese (Brouwer, 1962).

A linguagem de programação utilizada para a implementação do modelo ORGYOS foi o Borland Pascal 7.0. O ORGYOS é formado basicamente por quatro partes: uma principal com nome de Unit Fotosint, e outras duas unidades (Tipos, Partmec5). A versão final do modelo, apresentada no Capítulo 4, engloba ainda as unidades Report e Global e o programa principal que contém o ORGYOS denominado ORGYOS+AG. O Anexo 1 contém as listagens dos programas que constituem o modelo ORGYOS+AG.

Existem ainda arquivos de entrada de dados para o SOYGRO, como condições ambientais, e arquivos gerados pelo SOYGRO, como água disponível no solo, que servem como dados de entrada de ambientes para o ORGYOS que não são apresentados neste anexo.

No próximo item serão apresentados os dados de entrada para o modelo ORGYOS, e em seguida os resultados da simulação do modelo ORGYOS em comparação com os resultados do SOYGRO.

### 3.3.4 Condições do Ambiente (dados de entrada)

No modelo ORGYOS serão utilizados três conjuntos de dados ambientais provenientes do sistema SOYGRO (versão "demo"). Estes dados servem como input para o modelo ORGYOS. Alguns deles, são gerados através de submodelos complexos como o de água extraível, e outros dependem de latitude e longitude para obtenção do comprimento do dia, que é um fator importante para soja. Outros dados são:

- Dia do calendário juliano (a contagem dos dias segue a ordem de 1 a 365)
- Comprimento do dia em horas em função da latitude e longitude.
- Temperatura Mínima e Máxima diária.
- Água extraível pela planta em  $\text{cm}^3$  de água/ $\text{cm}^3$  de solo, com profundidade de até 150 cm.
- Photosynthetic Active Radiation (PAR), Radiação Fotossintética Ativa,  $\text{moles}/\text{m}^2/\text{dia}$

A nível de implementação, estes arquivos são lidos dos arquivos de input da versão "demo" do SOYGRO e utilizados para alimentar o modelo ORGYOS. Os dados climatológicos contidos nestes arquivos são referentes a Gainesville, Florida 1979, Estados Unidos.

### 3.3.5 Condições iniciais da Planta (dados de entrada)

Segundo Wilkerson (1983), e os dados coletados em Gainesville Florida (1978), foram utilizados espaçamentos de 91,4 cm entre linhas e 3,7 cm entre plantas. O espaçamento nos modelos em geral é uma variável, que permite ao usuário do modelo uma avaliação das alterações dele e suas implicações na produção.

Neste experimento as plantas em um estados V0 ( pós emergencia) tinham o peso inicial de 0,12 g/planta (não encontra-se definido no texto se o peso das raízes é contado ou não). O peso inicial das folhas era de 0,03 g/planta e a área foliar inicial de 9,69  $\text{cm}^2/\text{planta}$ . Assim com o espaçamento calcula-se o número de plantas/ $\text{m}^2$ , e peso inicial e área foliar/ $\text{m}^2$ , que na verdade é um índice importante que será utilizado futuramente na

fotossíntese, conhecido como Índice de Área Foliar (Leaf Area Index, LAI) que representa  $\text{m}^2$  de folhas/ $\text{m}^2$  de solo.

### 3.4 Comparação dos modelos ORGYOS e SOYGRO: Validação

Inicialmente deve ser lembrado que o objetivo do modelo ORGYOS é emular o comportamento da soja baseado nos dados de input (condições ambientais) obtidos do modelo SOYGRO. Assim sendo, foram extraídos dados de clima (Gainesville, Florida 1979) e executadas três simulações no SOYGRO com diferentes tratamentos, para se observar o comportamento da soja. O primeiro se refere a condição irrigada, o segundo em condições normais e o último com estresse hídrico na fase final de enchimento de grãos (produção).

Os gráficos apresentados a seguir demonstram o desenvolvimento das partes da soja (folhas, caule, raízes e grãos) obtidas através do SOYGRO e do modelo ORGYOS na condição irrigada.

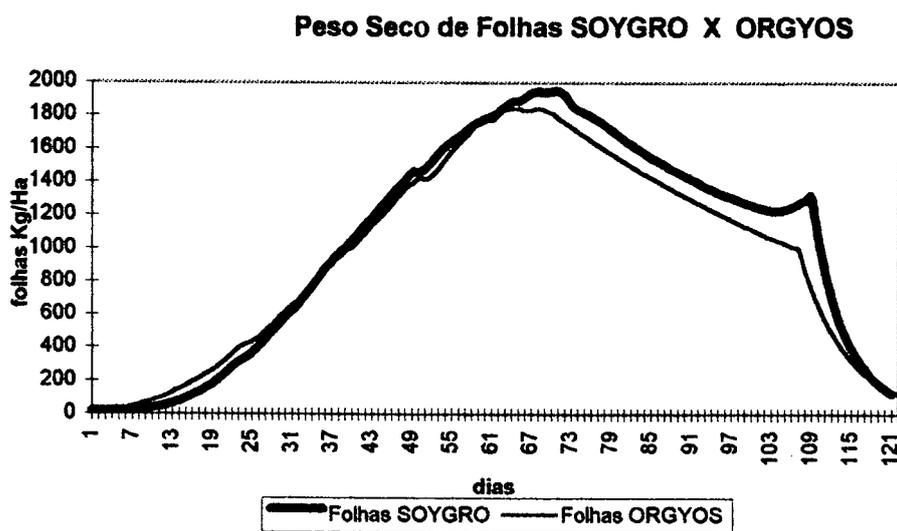


Gráfico 7: Acúmulo do peso seco de folhas nos modelos ORGYOS e SOYGRO na condição soja irrigada

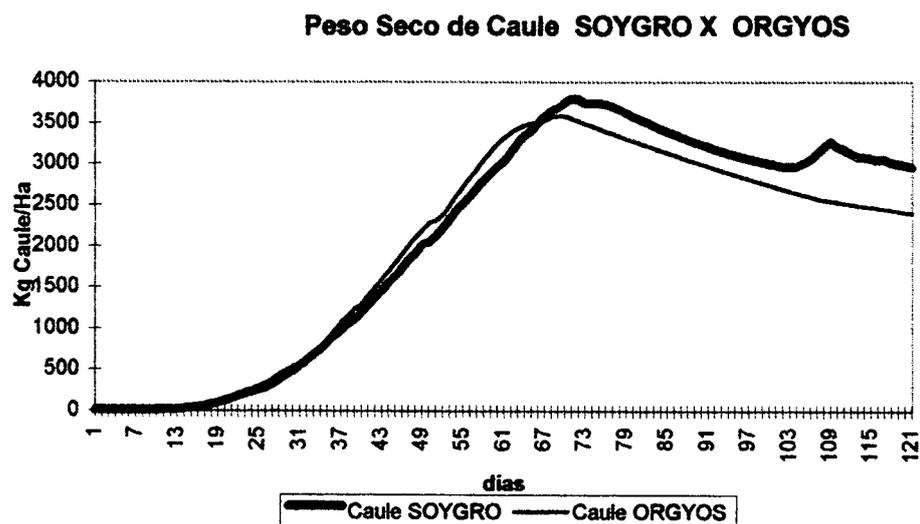


Gráfico 8: Acúmulo do peso seco de caule nos modelos ORGYOS e SOYGRO na condição soja irrigada.

Os Gráficos 7 e 8 representam o comportamento do desenvolvimento da soja quanto ao crescimento de folhas e caule no modelo SOYGRO comparado com a emulação deste desenvolvimento no modelo ORGYOS.

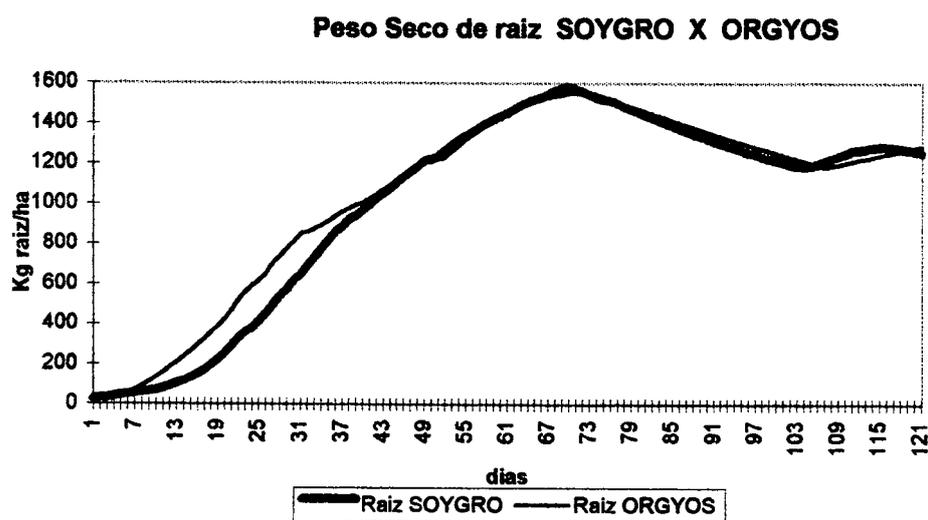


Gráfico 9: Acúmulo do peso seco de raiz nos modelos ORGYOS e SOYGRO na condição soja irrigada.

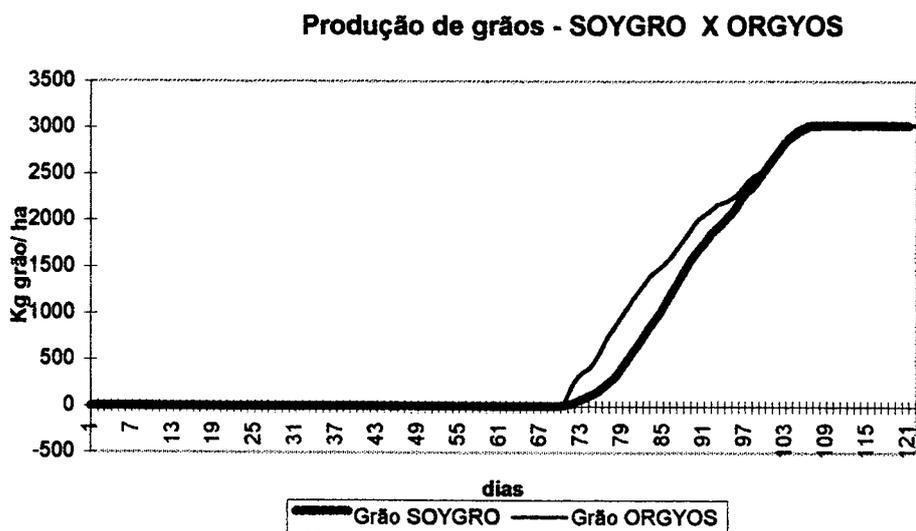


Gráfico 10: Acúmulo do peso seco de grão nos modelos ORGYOS e SOYGRO na condição soja irrigada.

Os Gráficos 9 e 10 representam o comportamento do desenvolvimento da soja quanto ao crescimento das raízes e grão no modelo SOYGRO comparado com a emulação deste desenvolvimento no modelo ORGYOS.

Nos gráficos 11 a 14 que seguem esta comparação serão apresentados o desenvolvimento das partes da soja (folhas, caule, raízes e grãos) obtidas através do SOYGRO e do modelo ORGYOS na condição da soja em estresse hídrico após a entrada no período reprodutivo.

A principal diferença no comportamento do crescimento da soja entre as duas situações (irrigada e em estresse hídrico) é verificado a partir do septuagésimo dia (70°) durante o cultivo. A partir deste dia o estresse hídrico atua na planta diminuindo a produção fotossintética, resultando em uma senescência mais acentuada e queda na produção como mostrando nos gráficos 11, 12, 13 e 14. Outra diferença é a diminuição do ciclo da planta em aproximadamente 6 dias.

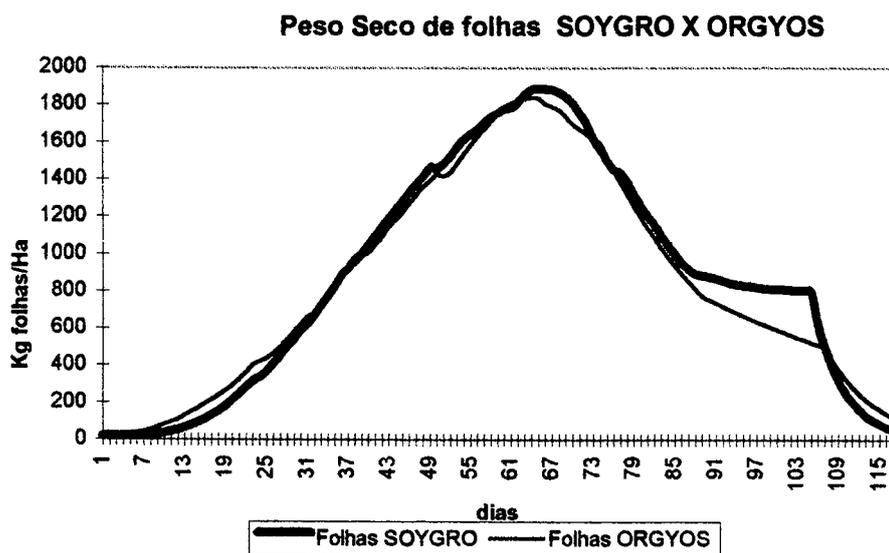


Gráfico 11: Acúmulo do peso seco de folhas nos modelos SOYGRO e ORGYOS na condição da soja com estresse hídrico.

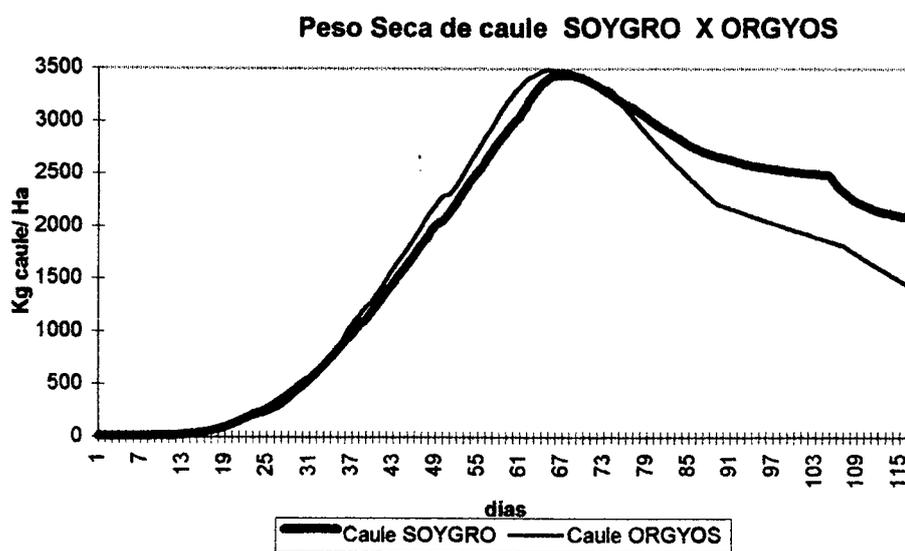


Gráfico 12: Acúmulo do peso seco de caule nos modelos SOYGRO e ORGYOS na condição da soja com estresse hídrico.

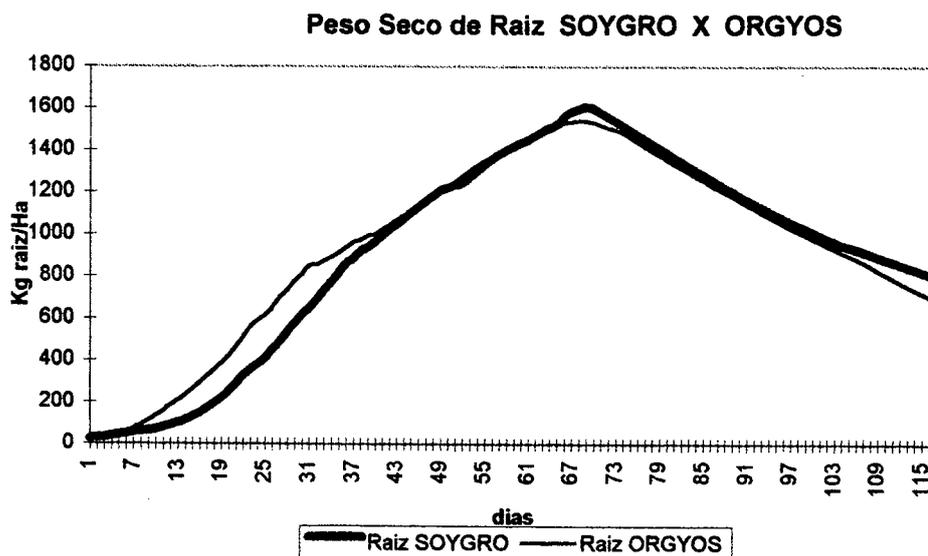


Gráfico 13: Acúmulo do peso seco de raiz nos modelos SOYGRO e ORGYOS na condição da soja com estresse hídrico

A diferença principal entre o gráficos 13 e 9, é verificada a partir do dia 106 onde ocorre a senescencia rápida.

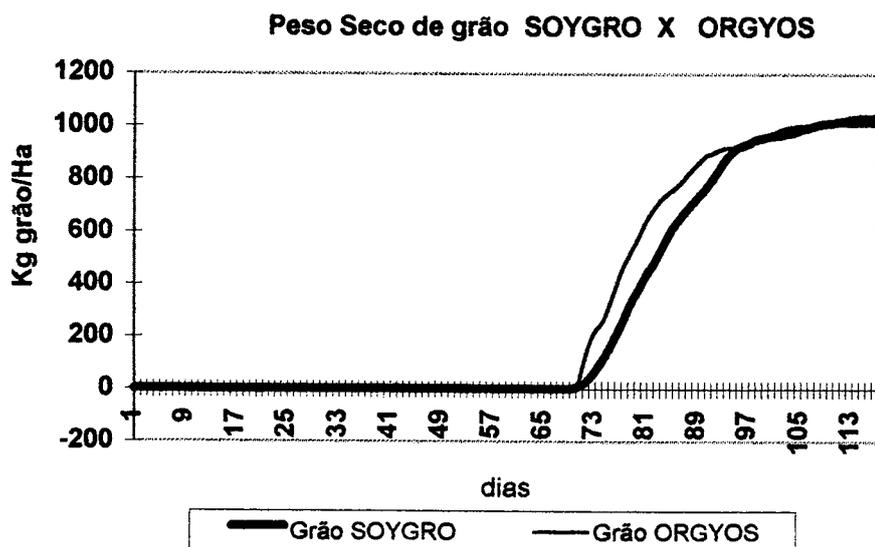


Gráfico 14: Acúmulo do peso seco de grãos nos modelos SOYGRO e ORGYOS na condição da soja com estresse hídrico

Nos gráficos que seguem são apresentados o desenvolvimento das partes da soja (folhas, caule, raízes e grãos) obtidas através do SOYGRO e do modelo ORGYOS na condição normal. Os resultados desta simulação são muito semelhantes a condição "soja

irrigado" apresentada anteriormente (compare os gráficos 7, 8, 9 e 10 com os gráficos 15, 16, 17 e 18 respectivamente).

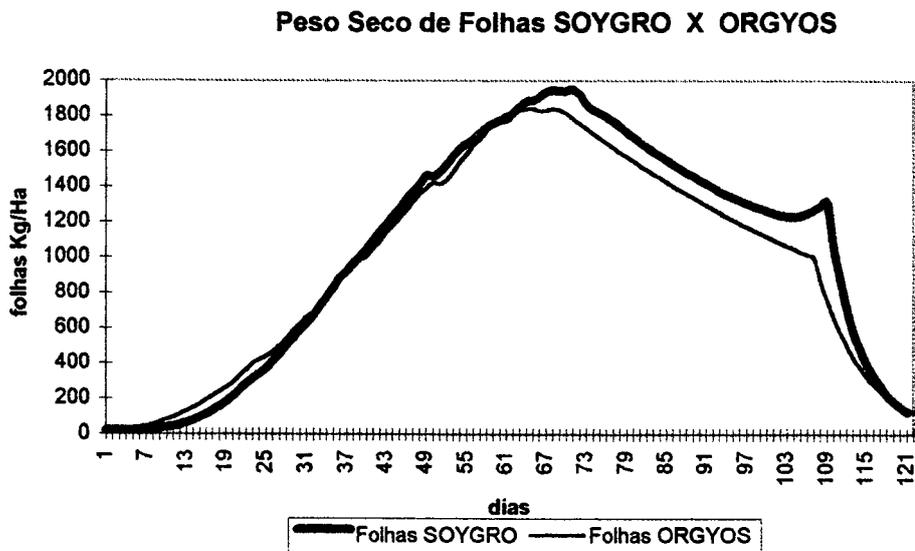


Gráfico 15: Acúmulo de peso seco de folhas nos modelos SOYGRO E ORGYOS na condição da soja normal.

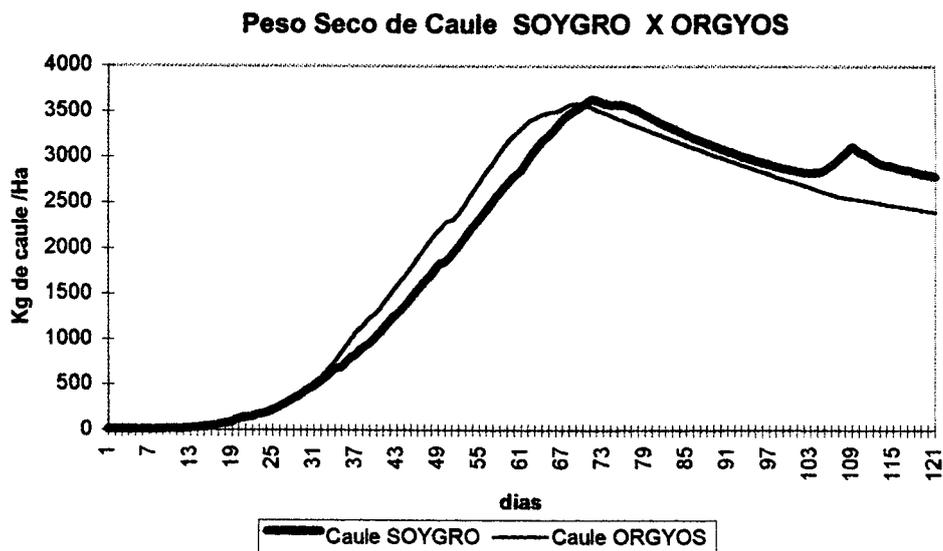


Gráfico 16: Acúmulo de peso seco de caule nos modelos SOYGRO E ORGYOS na condição da soja normal.

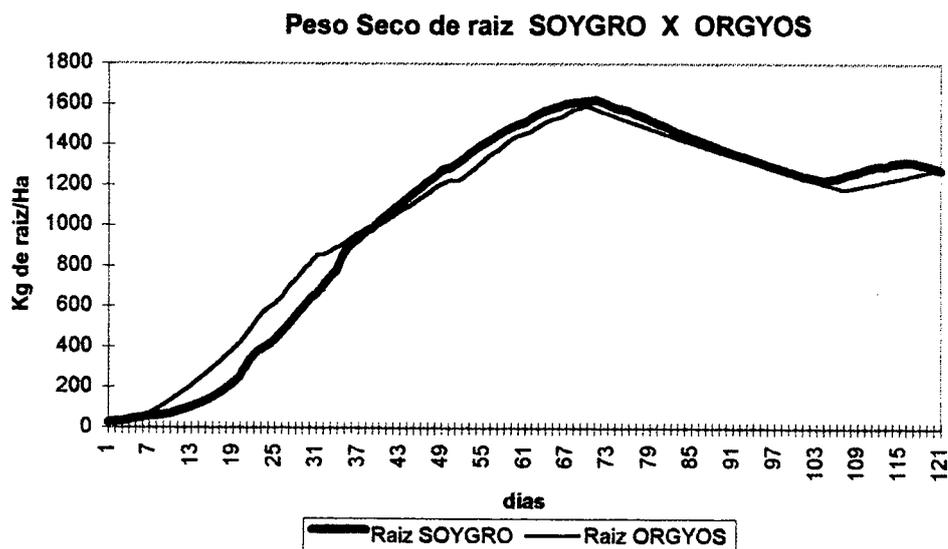


Gráfico 17: Acúmulo de peso seco de raiz nos modelos SOYGRO E ORGYOS na condição da soja normal

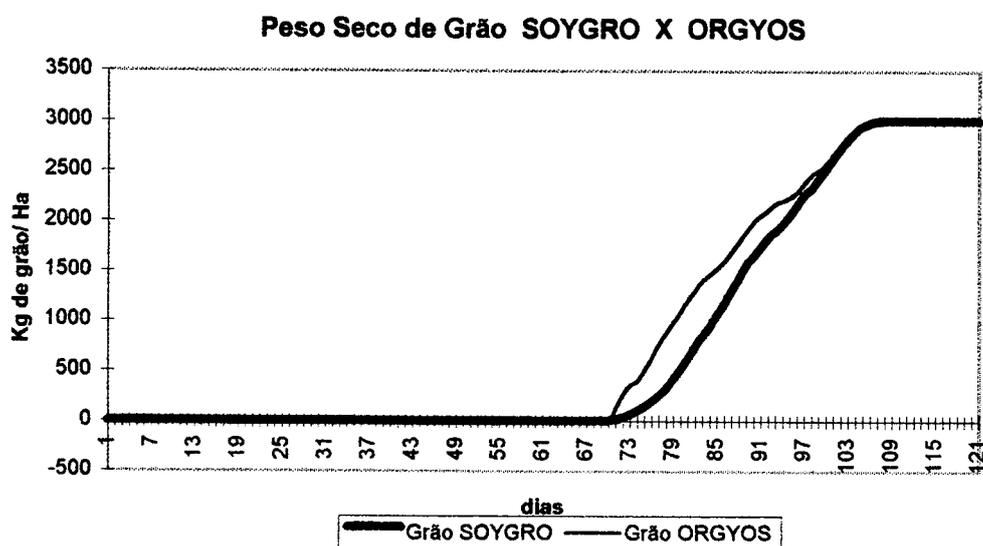


Gráfico 18 : Acúmulo de peso seco de grãos nos modelos SOYGRO E ORGYOS na condição da soja normal

Em uma avaliação rápida sobre os resultados apresentados graficamente verifica-se que o comportamento do modelo ORGYOS é bastante semelhante ao comportamento do SOYGRO para os casos analisados. Os resultados em termos de produção de grãos final para cada um dos ambientes analisados, encontram-se na Tabela 3, a seguir. Dada a semelhança do resultado nas condições "normal" e "irriga", já observada anteriormente,

apenas uma delas será avaliada sob a ótica de otimização por Algoritmos Genéticos no próximo capítulo.

Resultados de Produção de Grãos

condição	SOYGRO	ORGYOS
Irrigado	3025	3033
Normal	3003	3030
Estresse Hídrico	1031	1008

Tabela 3: Resultados de produção final de grão do SOYGRO e ORGYOS

Os gráficos 19 a 22 são provenientes do modelo ORGYOS e do SOYGRO para as condições irrigada e de estresse hídrico, apresentando o desenvolvimento de todas as partes consideradas (folhas, caule, raiz e grão), servindo como uma base de comparação visual.

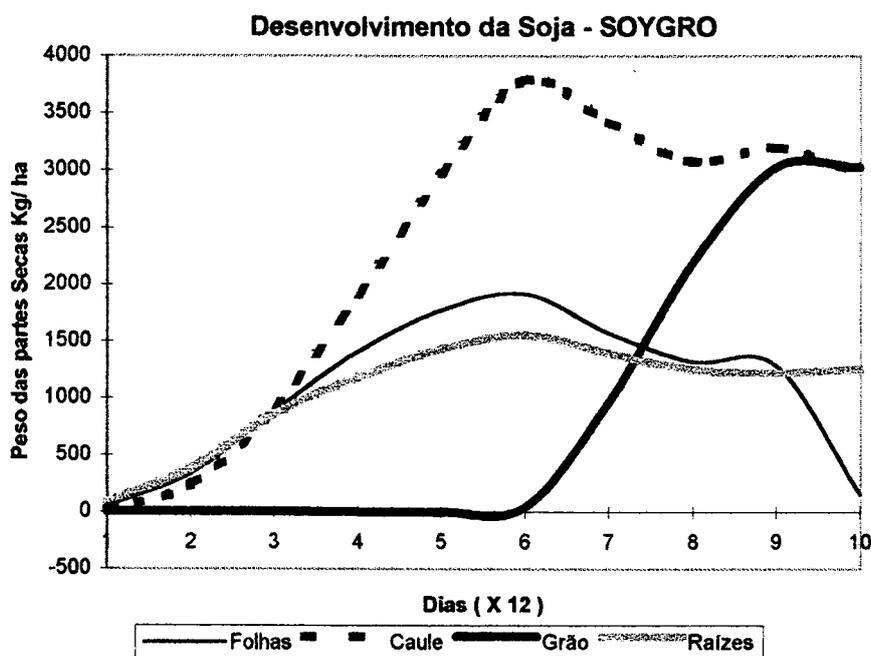


Gráfico 19: SOYGRO, soja na condição irrigada

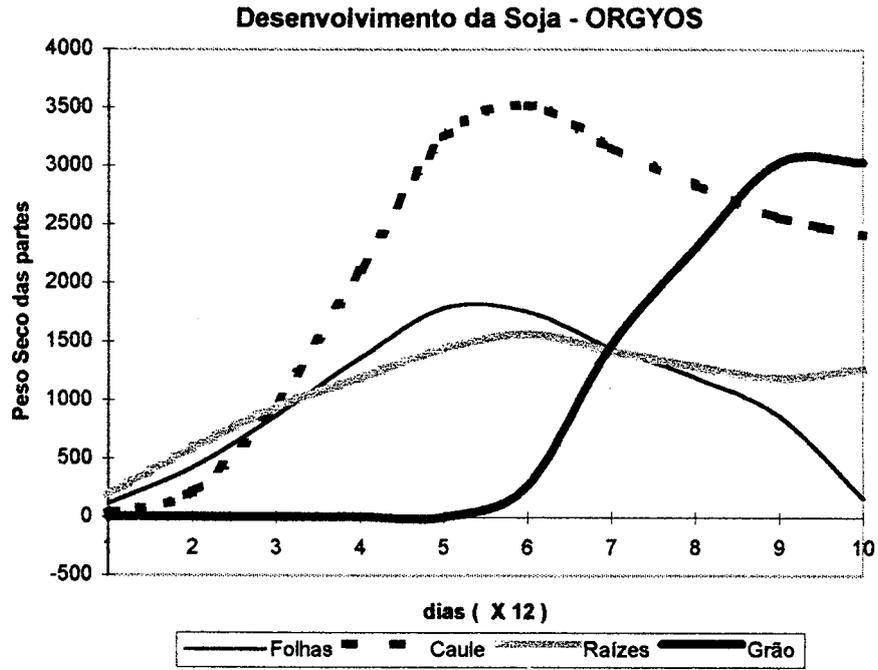


Gráfico 20: Modelo ORGYOS, soja na condição irrigada

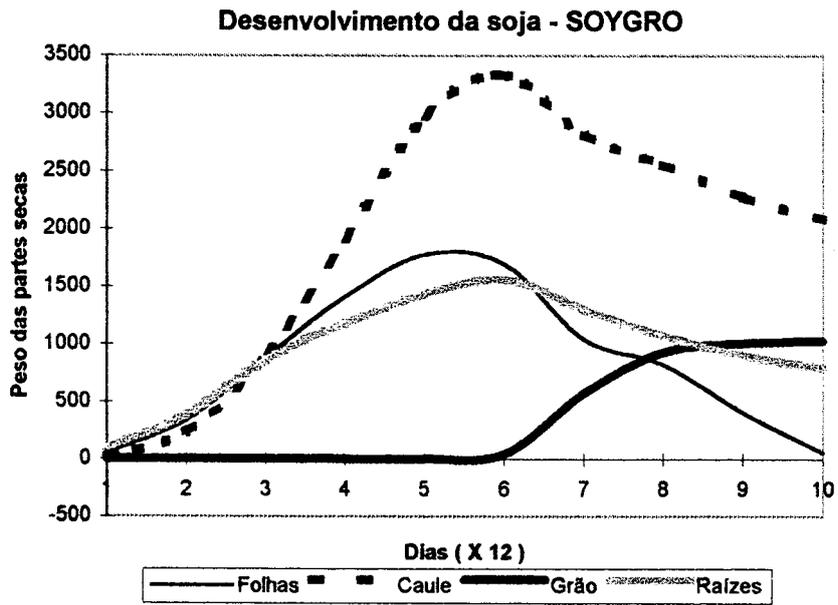


Gráfico 21: SOYGRO, soja na condição de estresse hídrico

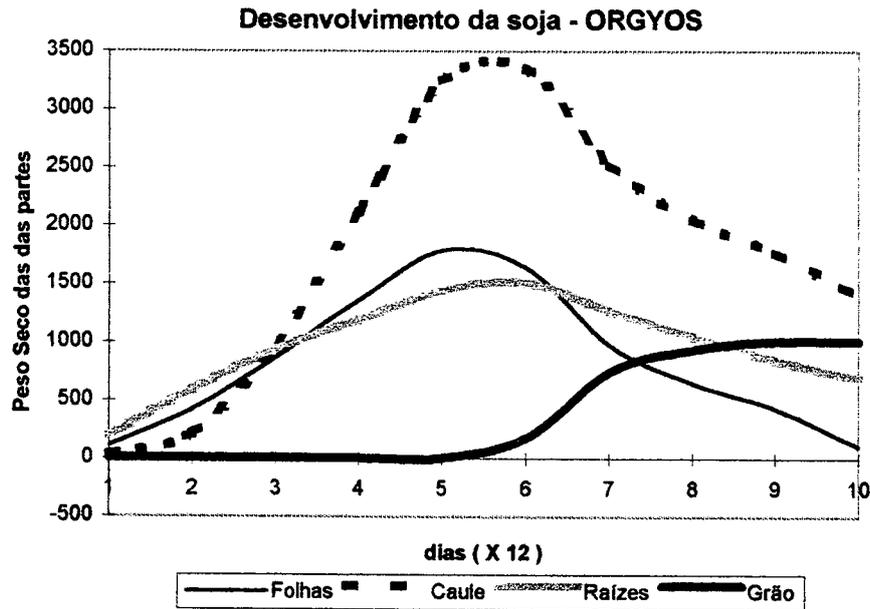


Gráfico 22: Modelo ORGYOS , soja na condição de estresse hídrico.

Além dos gráficos apresentados anteriormente (Gráficos 1 a 12), pode-se observar, pela Tabela 4, através do coeficiente de correlação calculados entre o SOYGRO e ORGYOS, o alto grau de semelhança no comportamento do desenvolvimento das partes da soja. O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) indica que o modelo ORGYOS representa pelo menos 94% da variação do comportamento entre os modelos ORGYOS e SOYGRO.

Tabela 4: Coeficientes de Correlação (R) entre trajetórias de Peso Seco das Partes da Planta Soja em três Condições Ambientais.

Partes da Planta	Condição Irrigada	Condição Normal	Condição Estresse Hídrico
Folhas	0.98832653	0.98128642	0.99052552
Caule	0.98480677	0.98190613	0.97265013
Raízes	0.99298688	0.99302138	0.98764140
Grão	0.99035641	0.99031827	0.98911182

Portanto pode-se concluir que o modelo ORGYOS está validado, isto é, que ele representa adequadamente o crescimento e a produção das plantas de soja para os casos analisados. Deve ser lembrado que o controle da partição do fotossintato no modelo é mecânico, alterando-se apenas em função do estágio fenológico das plantas.

## **IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO GENÉTICO (AG)**

### **4.1 Considerações Iniciais**

No AG são utilizados termos da biologia (genética, cromossomas, crossover etc...), que nem sempre tem uma correspondência direta com a realidade. Assim neste capítulo deve-se ter um certo cuidado ao interpretar a nomenclatura adaptada da biologia utilizada no AG. Esta terminologia busca uma relação entre os termos utilizados na Pesquisa Operacional e termos da biologia, “as vezes” facilitando o entendimento de como funciona e como se processa a busca de soluções no AG.

Os cientistas das áreas biológicas, poderão notar que, o empréstimo a terminologia da biologia utilizado no AG, é bem mais complexo do que a própria necessidade do tema. Esta adoção, criou situações que parecem absurdas dentro de um parecer biológico, no entanto criam uma certa simbologia mais fácil de entender o AG para cientistas de áreas exatas.

A principal referência para a introdução dos conceitos que envolvem a utilização do AG pode ser encontrada em Goldberg (1989), e algumas aplicações do AG podem ser verificadas em Chambers (1995). Nos parágrafos que seguem serão colocadas as principais idéias do AG, e como são utilizados os termos da genética em relação ao AG no problema proposto.

#### **4.2.1 Considerações Gerais Sobre os AGs**

Segundo Sumida et al (1990), os AGs são considerados poderosos algoritmos de busca heurística, que utilizam a evolução como a estrutura para efetuar a pesquisa no processo de busca. Na sua execução, existe uma troca aleatória de informações, assim como na genética, para produzir soluções (indivíduos) mais adaptadas através do tempo.

Como ressaltado anteriormente, o termo genético está associado a biologia, assim como os operadores utilizados no algoritmo (crossover e mutação), e representação da solução através de “cromossomas” no problema abordado. Os operadores são: mutação, reprodução e crossover. Estes serão esclarecidos mais detalhadamente na apresentação do modelo.

Uma solução, no AG, representa um indivíduo, codificado como um cromossoma dentro de uma população. Uma população de indivíduos no algoritmo genético, geralmente representa um conjunto de soluções viáveis no problema abordado. Em outras palavras, uma população é também um conjunto de cromossomas onde cada cromossoma representa uma solução viável do problema. Assim a melhor solução em um problema é representada por um indivíduo.

No caso deste trabalho, o AG é usado para alcançar uma estratégia ótima de particionamento do fotossintato, induzindo ao crescimento do vegetal e finalmente a maximização da produção. Esta solução (estratégia) é representada pelos cromossomas, que são implementados no AG como uma estrutura de dados em forma de vetores.

O caminho para solução é percorrido através de sucessivas gerações que se processam na execução do algoritmo. De uma geração para outra, efetuam-se avaliações de cada indivíduo (ou cromossoma), dentro da população, determinando-se o quanto cada indivíduo está ajustado ao ambiente (ou problema). Esta avaliação é conhecida como *fitness* (adaptabilidade). Para geração seguinte, em função do *fitness* alcançado por cada cromossoma, são atribuídos maiores probabilidades de reproduzir aos indivíduos com melhor índices de adaptação (*fitness*).

Esta seleção efetuada de geração a geração, ou seja, como um processo de seleção natural Darwiniano, devendo proporcionar um ganho cumulativo para os indivíduos da população (soluções viáveis) que se adaptarem da melhor forma ao ambiente. O melhor indivíduo após  $n$  gerações será portanto a melhor solução alcançada pelo algoritmo.

Na implementação do Algoritmo Genético, em qualquer tipo de problema, existem três passos principais a serem seguidos:

- 1 - Representação de Indivíduos (cromossomas).
- 2 - Determinação da função "Fitness"
- 3 - Aplicação dos Operadores Genéticos (mutação e crossover)

#### 4.2.2 - Representação de Indivíduos ou Cromossomas.

Um cromossoma geralmente é uma estrutura na forma de um vetor onde cada posição neste vetor representa um gene, que é preenchido com um alfabeto ou código a critério do modelador. Segundo Margarita (1993), a utilização do alfabeto binário (0,1) para representação de indivíduos da população é bastante comum mas no entanto limitada. "Nós não podemos usar somente alfabetos com mais de dois símbolos como também usar valores reais para um simples gene do cromossoma". Portanto na representação do problema deve-se definir parâmetros importantes, e escolher um alfabeto ou conjunto de caracteres que represente cada um desses parâmetros, sendo que cada caracter tem seu significado específico.

Definir a "string" (cadeia ou seqüência de caracteres que representa o cromossoma de um indivíduo), significa uma concatenação dos diferentes parâmetros codificados pelos caracteres. Assim a "string" representa o cromossoma onde os operadores genéticos vão agir durante a evolução. Neste trabalho o cromossoma deve definir como fazer a partição do fotossintato produzido no ciclo produtivo para viabilizar a maximização da produção grãos.

Esta partição foi representada de uma forma relativa, indicando uma quantidade percentual de fotossintato a ser distribuído diariamente. A Figura 3 a seguir demonstra o esquema de representação do cromossoma sob a forma de uma matriz facilitando a sua visualização, a nível de programação esta matriz esta transformada em um vetor, melhorando a performance dos operadores mutação e crossover. A quantidade de fotossintato diária destinado aos diferentes tecidos vegetais é feita através do percentual representado na matriz. A soma de cada coluna nesta matriz deve ser equivalente a 100%,

igualando ao total da fotossíntese líquida a ser distribuída naquele dia. Onde as colunas  $t_0, t_1, t_2, \dots, t_n$  representam a partição percentual da matéria seca produzida pela fotossíntese nos dias  $t_0, t_1, t_2, \dots, t_n$  respectivamente.

	$t_1$	$t_2$	....	$t_n$
<i>RAIZ</i>	20%	30%	20%	22%
<i>CAULE</i>	38%	24%	10%	10%
<i>FOLHAS</i>	42%	46%	70%	10%
<i>GRÃO</i>	0%	0%	0%	58%

Figura 3 - Representação do cromossoma (matriz) com partição relativa

Inicialmente concebeu-se que a cada coluna representaria um dia dentro do horizonte de cultivo da soja. Nesta representação a matriz teria um tamanho de quatro linhas por cento e vinte colunas (4 X 120), no caso um vetor, 480 posições.

Com a representação (4 X 120) a busca do AG tornou-se lenta e dispersa, ou seja de baixa performance no espaço de solução considerado através desta representação. Por outro lado, analisando a matriz de coeficientes originais do modelo ORGYOS, verificou-se que os coeficientes de partição não se alteram com frequência dentro do horizonte do cultivo. Em outras palavras, a política do particionamento de um dia para o outro na planta não se altera bruscamente. Por estes motivos trabalhou-se no sentido de diminuir o espaço de busca não perdendo a representatividade do cromossoma de demonstrar a solução do problema.

Neste sentido, foi proposto uma condensação do modelo de representação, isto é, cada 12 dias do horizonte de cultivo foram representados por uma só coluna na matriz. Isto significa que, o espaço de busca foi reduzido consideravelmente melhorando a performance do AG.

Buscando novamente determinar uma representação do cromossoma, que permita uma boa performance do algoritmo, a função (fotossíntese bruta) que determina a produção do fotossintato, foi também analisada. O objetivo desta análise foi o de examinar qual poderia ser o ganho do sistema de produção (folhas, caule e raízes), quando o fotoassimilado fosse alocado em cada uma das partes folha, caule e raiz.

Analisando primeiramente o tecido folha, pela função  $P_G$  grãos (Função fotossíntese bruta  $P_G = k_p \cdot P_G^{\max} \cdot f_L \cdot f_\theta \cdot f_T \cdot f_N$ , Capítulo 3) percebe-se que o material alocado para este tecido tem uma relação custo/benefício favorável ao desenvolvimento do vegetal, já que o investimento em folhas no período  $i$  tem um retorno rápido para o próprio sistema de produção (folhas  $\Rightarrow$  fotossíntese  $\Rightarrow$  fotossintato). Além deste fato, segundo Yamagata, Kouchi et Yoneyma (1987), ainda podemos considerar que existe uma reserva no tecido folha, que é liberada no período de enchimento de grãos. Ainda outras análises sobre relações custo/benefício e teorias da microeconomia aplicadas no desenvolvimento dos vegetais são encontradas em Bloom et al (1985).

Segundo Yamagata, Kouchi et Yoneyma (1987), também pode ser considerado que reservas são liberadas no período de enchimento de grãos do tecido caule. Havendo assim um motivo, ainda que fraco para destinar fotoassimilado para o caule.

Quanto a raiz dentro do modelo ORGYOS e a função  $P_G$ , sua relação custo/benefício é bastante desfavorável, já que além de não haver um retorno em termos de produção de fotoassimilado, ainda perde-se fotossintato que poderia ser distribuído para os tecidos folha e/ou caule durante a fase vegetativa da planta.

Idealmente seria conveniente obter uma função para fotossíntese líquida, que respondesse a quantidade dos diferentes tecidos, folhas para captação de  $\text{CO}_2$  e luz, e raízes para captação de água e nutrientes. Neste caso o tecido caule, teria uma função de reserva e sustentação junto uma quantidade de folhas (dentro de certos limites). Apesar de todo avanço da fisiologia vegetal e simulação, tal função não se encontra ainda prontamente disponível. A relação peso seco de raízes e quantidade de insumos (água e nutrientes) . podem ser encontradas em Van Keulen et Wolf (1979).descrevendo relações entre a produção fotossintética. No entanto, deve-se ainda desenvolver procedimentos para adicionar tal relação a função  $P_G$  utilizada.

Com algumas das dificuldades apresentadas, chegou-se a representação final do indivíduo. O percentual do fotossintato destinado a **raiz é fixo** conforme tabela 1 (Capítulo

2), e os percentuais (coeficientes de partição) destinados a folhas, caule e grãos são livres. Ou seja a serem decididos pela busca do AG.

Esta redução no espaço de busca, associada a condensação do cromossoma, apresentara um cromossoma em forma de um vetor de 30 posições, onde cada posição representa 12 dias, e cada 10 posições representam 120 dias (duração do cultivo) de uma das componentes (folha caule ou grão), e o alfabeto utilizado são números reais de 0 a 100. A figura 4 permite uma representação do cromossoma utilizado.

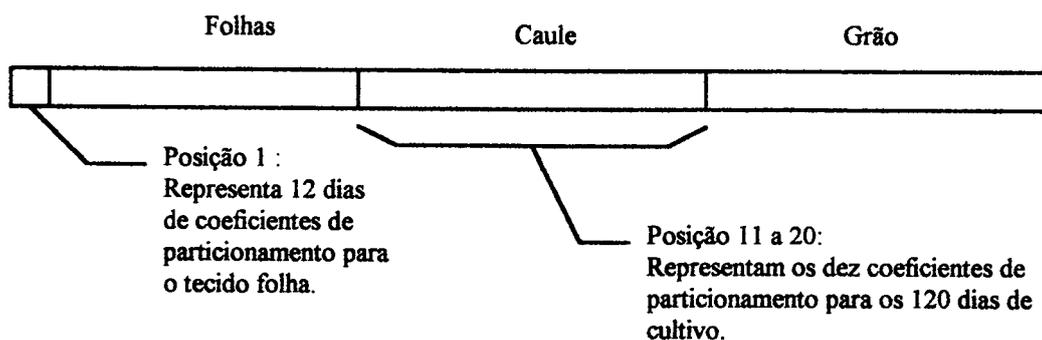


Figura 4 - Representação do vetor cromossoma.

#### 4.2.3 Determinação da função "Fitness"

Uma vez decidido como representar o indivíduo, sua codificação deve possibilitar a computação de um "valor". Este valor representa a capacidade inerente ao indivíduo ou cromossoma de melhor se adaptar ao problema proposto, neste caso a partição do fotossintato, que determinara sua estratégia para produzir. Esta medida de capacidade dentro do AG é obtida através da função *fitness*.

Esta medição tem grande importância, já que os indivíduos com baixo *fitness* são eliminados de uma geração para outra, não fazendo parte do processo evolutivo. A Figura 5 a seguir representa o ciclo de avaliação executado pela função *fitness* dentro algoritmo genético.

Em um primeiro instante  $t_0$ , considera-se todos os indivíduos da população, com o mesmo estado. Em outras palavras, considera-se plantas emergentes onde a estrutura do

vegetal é igual no primeiro dia. A partir deste instante, com as condições ambientais conhecidas durante todo horizonte, e com a função fotossíntese bruta diária obtém-se uma resposta em forma de fotoassimilado. Após o processo da respiração, o fotoassimilado é alocado nas diferentes partes do vegetal em função dos coeficientes de partição gerados aleatoriamente, contidos nos cromossomas para os dias 1,2...n durante o período de cultivo.

A função *fitness* deve representar a estratégia de alocação durante o cultivo que permite a melhor condição para a produção de grãos. Ou seja, para se avaliar um cromossoma, o modelo ORGYOS é adicionado no AG, tornando capaz a avaliação de diversas possibilidades de particionamento, simulando para cada possibilidade a produção de grãos de uma planta dado as condições do ambiente. Assim a performance de cada possibilidade de particionamento (cromossoma) é igual a sua produção de grãos no período avaliado. *Em suma o que foi chamado anteriormente de modelo ORGYOS, agora toma parte integral da função "fitness".*

Desta forma, no atual modelo ORGYOS + AG, somente foi considerado como objetivo do AG implementado, avaliar a produção de grãos. Entretanto existem ainda outras possibilidades de avaliação que serão apresentadas e discutidas no final deste trabalho.

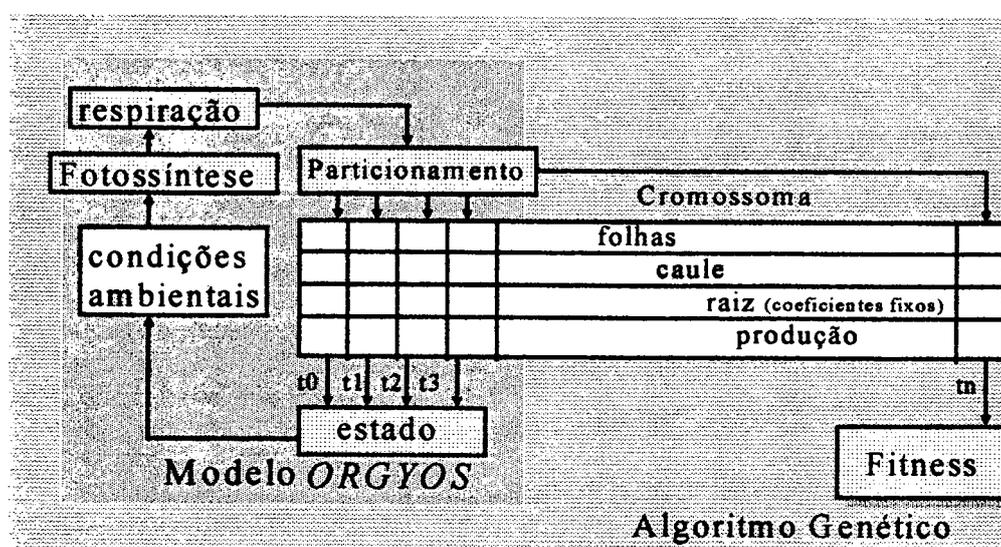


Figura 5 - Representação do AG envolvendo o modelo ORGYOS

#### 4.2.4 Aplicação dos Operadores Genéticos

A evolução ou caminho para solução, ocorre através do seguinte ciclo dentro do AG. Inicia-se com a formação de uma população de cromossomas onde os coeficientes de partição são gerados aleatoriamente, respeitando-se as restrições de acordo com sua representação e código escolhido (alfabeto). O valor da função *fitness* é computado para cada indivíduo da população em cada geração. Novamente em cada geração selecionam-se os indivíduos de maior *fitness*, ou seja, os mais adaptados para reprodução.

Esta seleção pode ser proporcional ao *fitness* ou simplesmente escolhendo-se os melhores. Neste trabalho utilizou-se para a seleção a “roleta”, isto é, a chance de que um indivíduo seja escolhido para reproduzir é proporcional a ao seu valor obtido no *fitness*. Também foi utilizado, como outro mecanismo para a evolução, sempre passar o melhor indivíduo para a população seguinte, podendo-se considerar isto como uma reprodução elitista de 2%. Detalhes das técnicas de seleção podem ser encontrados em Golberg (1989).

Aos pares de indivíduos escolhidos, aplicando-se uma probabilidade de ocorrência do operador crossover intercambiando-se substrings dentro de cada par de indivíduos. Com uma dada probabilidade aplica-se o operador mutação. Este operador, pode introduzir mudanças em cada cromossoma que podem ou não produzir um ganho na avaliação do cromossoma.

O processo novamente inicia-se, computando a função *fitness* para todos novos indivíduos da nova geração, até que um número máximo de gerações sejam alcançadas ou não ocorra nenhuma melhora significativa na população, ou melhor indivíduo.

**Operador Mutação** - A atuação do operador mutação neste cromossoma é a alteração aleatória dos percentuais envolvidos na representação do cromossoma, com uma determinada probabilidade de ocorrência. Esta alteração pode acontecer, segundo sua probabilidade, em qualquer uma das 30 posições do cromossoma.

Operador Crossover - Este operador atua na reprodução com probabilidades definidas, possibilitando uma quebra no cromossoma do indivíduo 1 que é concatenado a uma quebra no mesmo ponto (locus) do cromossoma do indivíduo 2 e vice-versa. Este operador, neste trabalho, somente atua uma vez em cada cromossoma.

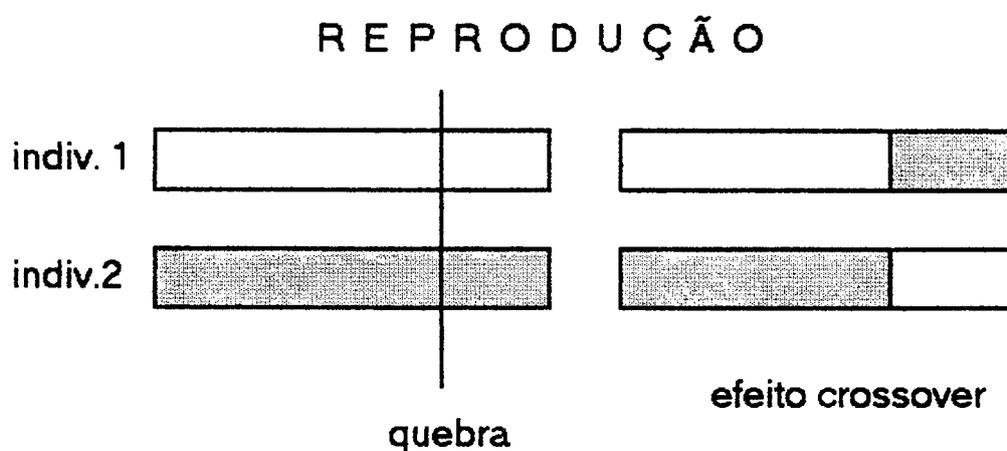


Figura 6: Representação do efeito crossover na reprodução.

As alterações provocadas pelos operadores (mutação e crossover) na maioria das vezes geram cromossomas que violam a restrição do particionamento: que a soma do fotossintato distribuído entre as partes do vegetal deve ser igual 100. Assim criou-se um procedimento, denominado normalização, para viabilizar todos os cromossomas alterados pelos dos operadores.

Os parâmetros *número de indivíduos*, *probabilidades de mutação e crossover* e *gerações* foram ajustados durante os testes como o sistema (ORGYOS + AG). Os ORGYOS foram executados em um computador contendo um processador NexGen 586, 100 Mhz. Em uma primeira bateria de testes foi avaliado o valor da solução em relação ao tamanho da população (entre 20 e 100 indivíduos) e número de gerações (entre 200 e 800). O tempo de processamento nos casos testado foi um fator a ser considerado, pois para os casos de uma busca menor (20 indivíduos e 200 gerações) este chegou a aproximadamente 20 minutos, e nos casos de busca maior aproximadamente 7 horas. O resultado foi o fator mais importante considerado para estes dois parâmetros, e entre os testes executados os melhores resultados ocorreram antes da geração 400, sendo 400 o número de gerações adotado como padrão para os testes finais.

Foram testados populações de tamanhos diferentes com 30, 50, 100 e 200 indivíduos. O tamanho da população influenciou consideravelmente o tempo de execução do programa, e nem tanto a qualidade da solução. Assim optou-se por uma população padrão de cinquenta (50) indivíduos para execução dos testes finais.

Para os parâmetros probabilidade de mutação e crossover, novamente foi feita uma bateria de testes avaliando o resultado. A probabilidade de mutação foi variada entre 1% e 70%. Em função do alfabeto escolhido (0 a 100), a qualidade da resposta esteve ligada a probabilidades maiores de mutação. Assim sendo foi adotado como padrão 50% de probabilidade de mutação. A velocidade de convergência do Modelo ORGYOS + AG, também foi influenciada pela probabilidade de crossover, sendo adotado chances de 80% de acontecimento de crossover.

#### 4.3 Resultados Obtidos.

Após a padronização dos parâmetros do AG (população, gerações, probabilidade de crossover e mutação), foram executados os testes finais com o modelo *ORGYOS + AG*. Os testes consistiram na execução do modelo *ORGYOS + AG* por quinze vezes para as condições de ambiente <sup>1</sup>irrigado e de estresse hídrico. Em média, cada execução levou o tempo aproximado de uma hora de trinta minutos.

O objetivo principal do AG implementado foi a maximização da produção de grãos, lembrando que os coeficientes de partição para raiz encontram-se fixados. Um ponto a ser ressaltado neste processo de otimização, encontra-se no fato que os resultados gerados neste sistema, foram somente restringidos pelo horizonte de cultivo (120 dias). Os gráficos 17 a 28 demonstram como seria o crescimento teórico da "soja" do modelo *ORGYOS* quando os coeficientes de partição são provenientes do processo de otimização do AG, em duas situações diferentes (irrigado e estresse hídrico).

---

<sup>1</sup> Conforme já mencionado decidiu-se não avaliar a condição normal porque os resultados de produção foram muito semelhantes a condição irrigada.

A média geral (50 indivíduos X 400 gerações) gerada em 15 repetições do modelo ORGYOS+AG ficou em torno de 800 Kg soja/Ha para a condição irrigada, e em torno de 400 Kg de soja/Ha na condição de estresse hídrico.

A média geral dos melhores cromossomas, nas 15 repetições, indicadora da otimização da produção pela adequada partição do fotossintato, situou-se em 3105 Kg de soja/Ha para a condição irrigada, e 1148 para a condição de estresse hídrico. Lembrando que a produtividade do modelo ORGYOS nestas duas condições foi de 3033 e 1008 respectivamente (vide Tabela 5). Assim, observa-se que o AG não conseguiu gerar rendimentos sensivelmente maiores do que os obtidos com coeficientes de partição fixos sobre os observados no modelo SOYGRO.

Tabela 5 Resultados de produção de grãos (Kg/Ha)  
dos Modelos SOYGRO, ORGYOS e ORGYOS+AG

modelos \ condições	Irigado	Estresse Hídrico
SOYGRO	3025	1031
ORGYOS	3033	1008
ORGYOS +AG	3105	1148
<b>Diferença Percentual entre os Modelos</b>		
SOYGRO X ORGYOS +AG	2.64%	11.34%
ORGYOS X ORGYOS + AG	2.37%	13.88%

Tabela 5 - tabela de resultados

Observa-se também que existe um a grande flexibilidade de partições que resultaram em variadas trajetórias do desenvolvimento da matéria seca das diferentes partes da planta mas levando sempre a um resultado de produção "máxima" semelhante (lembrando que o AG não garante o máximo). Isto é ilustrado pela comparação das trajetórias apresentadas nos gráficos 23 a 34 a seguir.

Neste ponto em si, deve ser lembrado que não foram colocadas no modelo ORGYOS+AG restrições quanto a possíveis proporções entre raiz caule e folhas. Obviamente há de se supor que na natureza, desequilíbrios entre as partes do conjunto prejudicariam o seu funcionamento, e portanto seriam eliminadas do processo de seleção.

No entanto, mesmo sem este tipo de restrição, o modelo ORGYOS+AG permitiu demonstrar que o sistema “planta e ambiente” converge por caminhos alternativos para otimização. Apesar do resultado (produção de grãos), a não inclusão de tal restrição ainda é uma forte limitação do modelo apresentado (ORGYOS+AG).

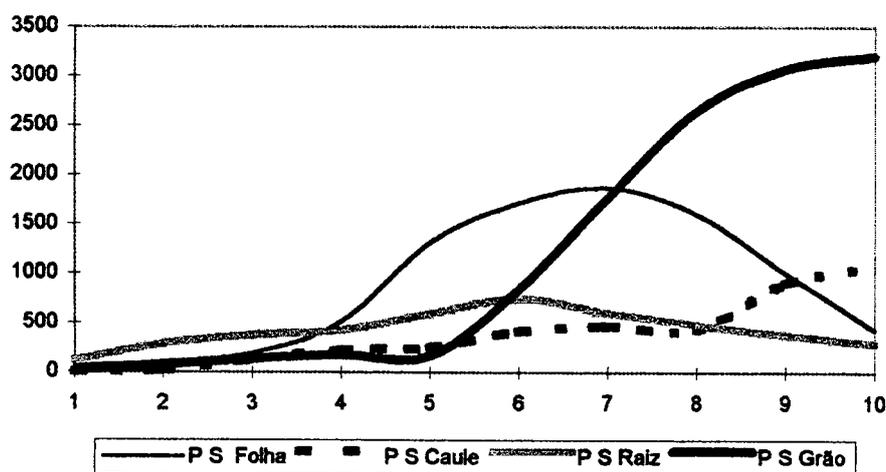


Gráfico 23 - Modelo ORGYOS + AG, produção final 3202 Kg Grão/ Ha.

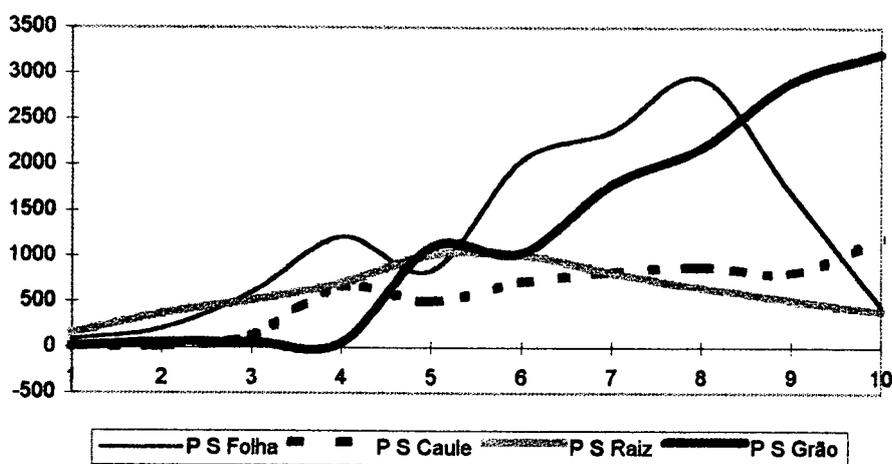


Gráfico 24 - Modelo ORGYOS + AG, produção final 3216 Kg Grão/ Ha.

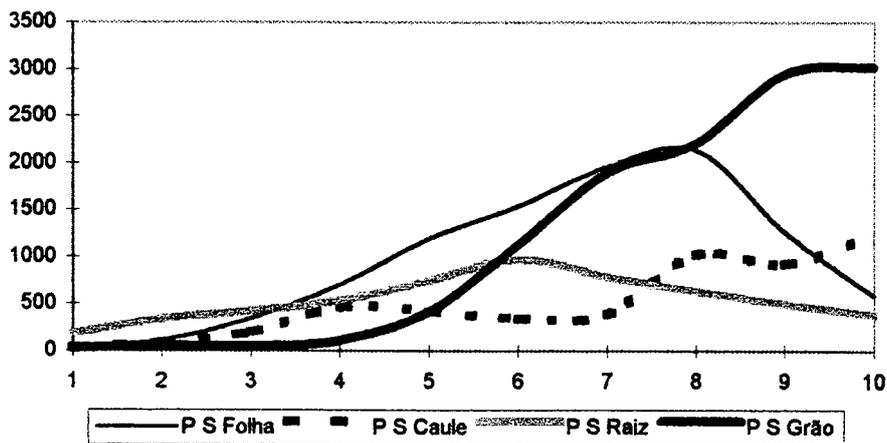


Gráfico 25 - Modelo ORGYOS + AG, produção final 3027 Kg Grão/ Ha.

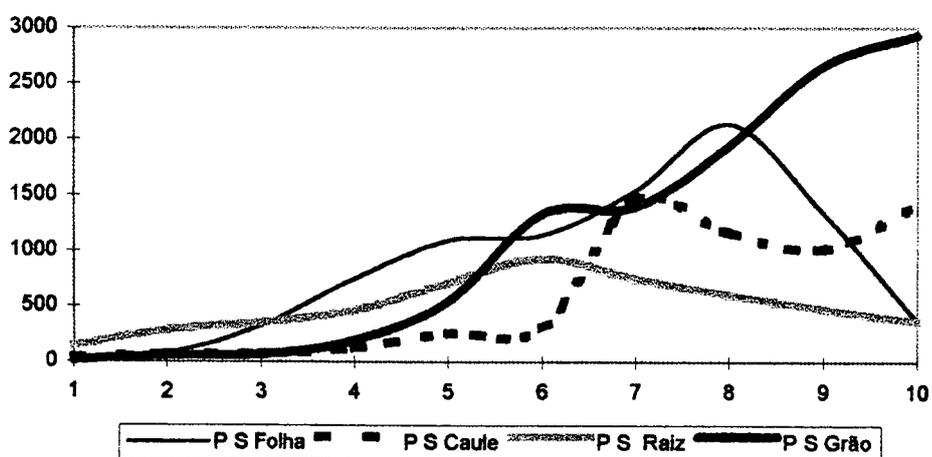


Gráfico 26 - Modelo ORGYOS + AG, produção final 2932 Kg Grão/ Ha.

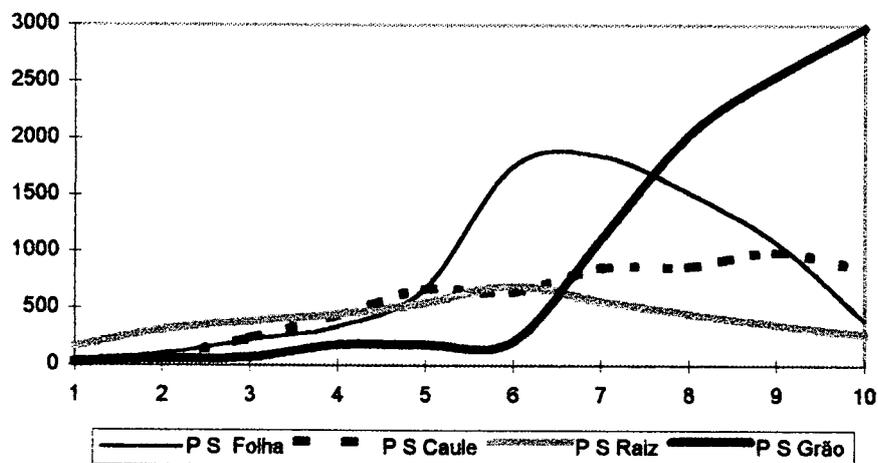


Gráfico 27 - Modelo ORGYOS + AG, produção final 2974 Kg Grão/ Ha.

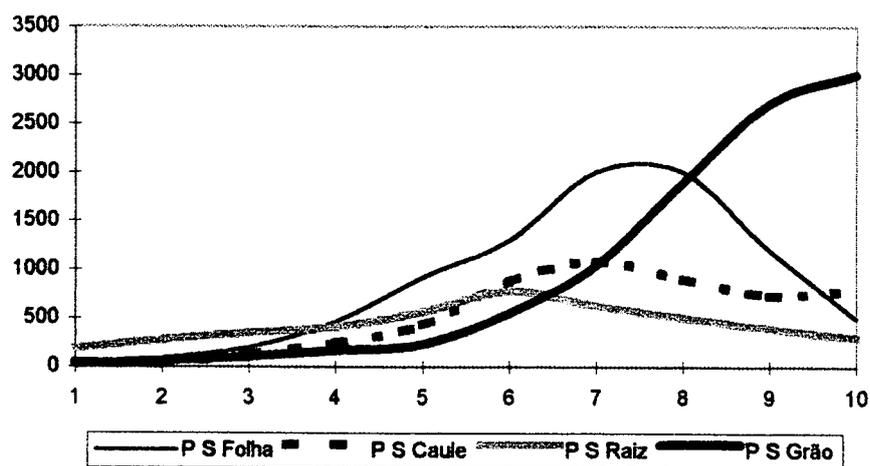


Gráfico 28 - Modelo ORGYOS + AG, produção final 3004 Kg Grão/ Ha.

A mesma situação de flexibilidade de partições resultando em variadas trajetórias do desenvolvimento também é observada na condição de estresse hídrico, conforme ilustram os gráficos 29 a 34. Onde P S (representa o peso seco).

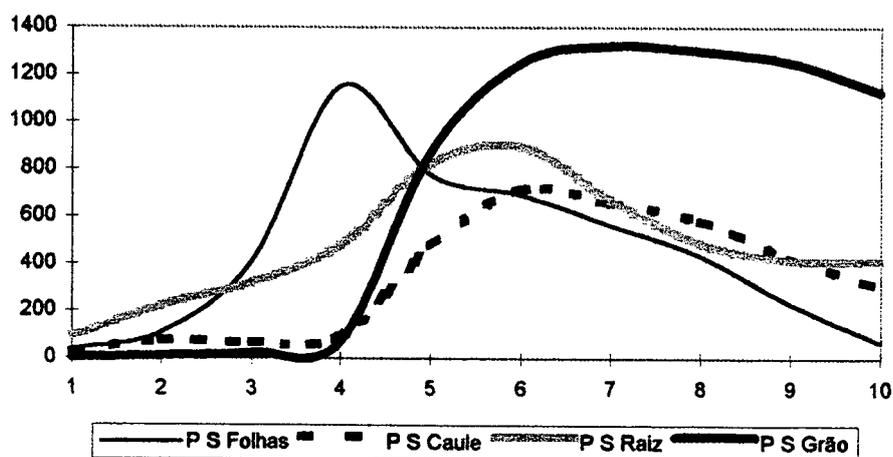


Gráfico 29 - Modelo ORGYOS + AG, produção final 1125 Kg Grão/ Ha.

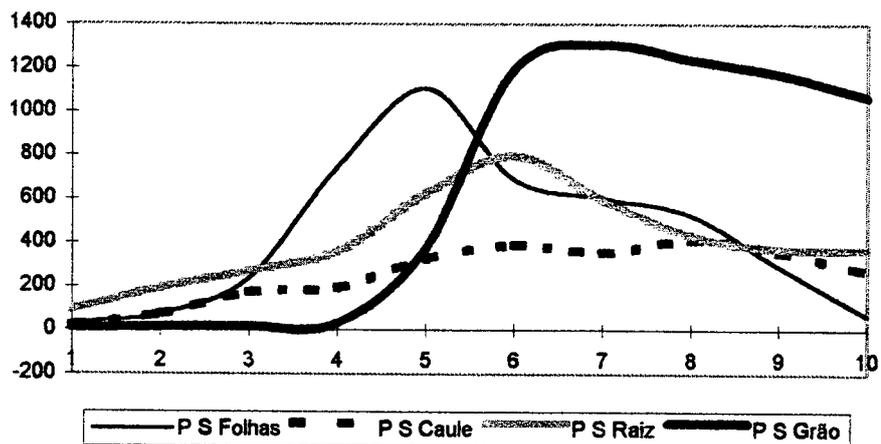


Gráfico 30 - Modelo ORGYOS + AG, produção final 1068 Kg Grão/ Ha

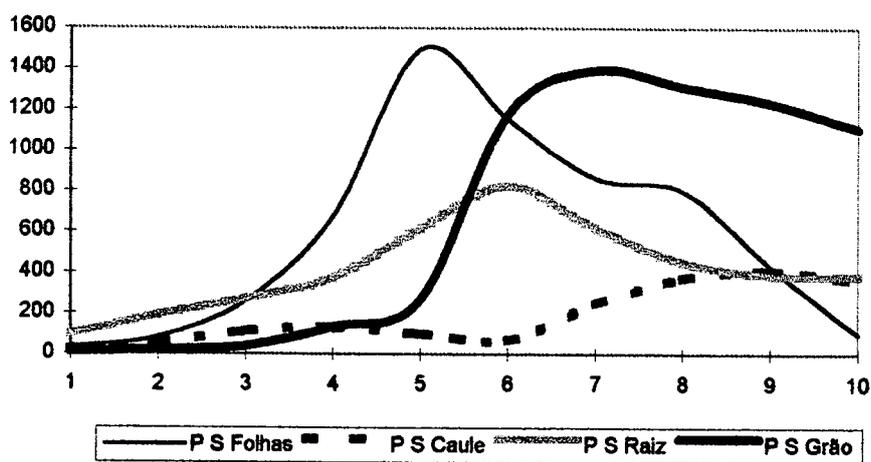


Gráfico 31 - Modelo ORGYOS + AG, produção final 1104 Kg Grão/ Ha

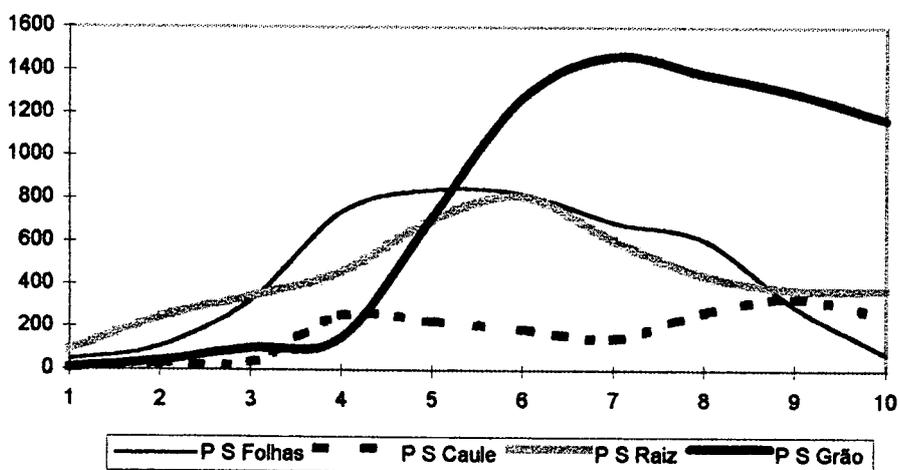


Gráfico 32 - Modelo ORGYOS + AG, produção final 1167 Kg Grão/ Ha

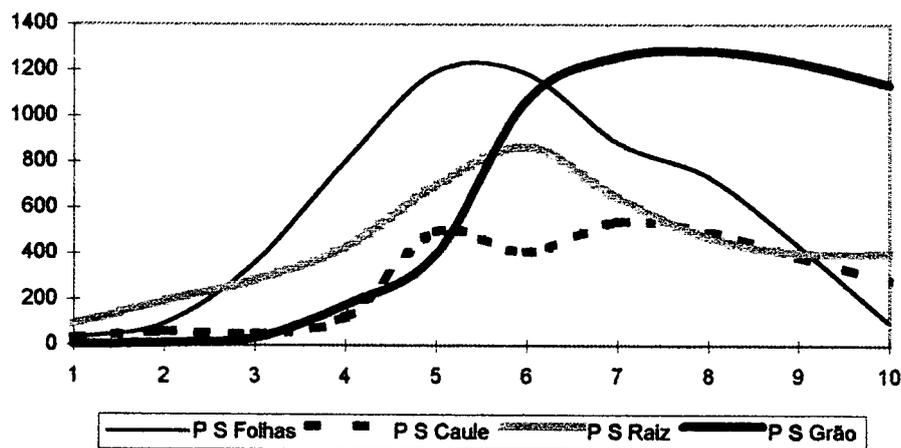


Gráfico 33 - Modelo ORGYOS + AG, produção final 1138 Kg Grão/ Ha

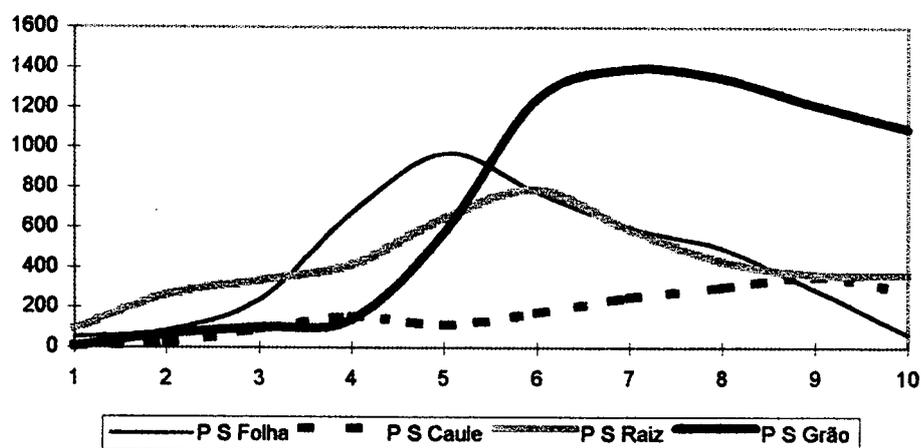


Gráfico 34 - Modelo ORGYOS + AG, produção final 1091 Kg Grão/ Ha.

Os gráficos 35 a 37 tratam da confrontação dos resultados referentes ao desenvolvimento e produção do grão. As análises referentes a estes gráficos será feita no final capítulo.

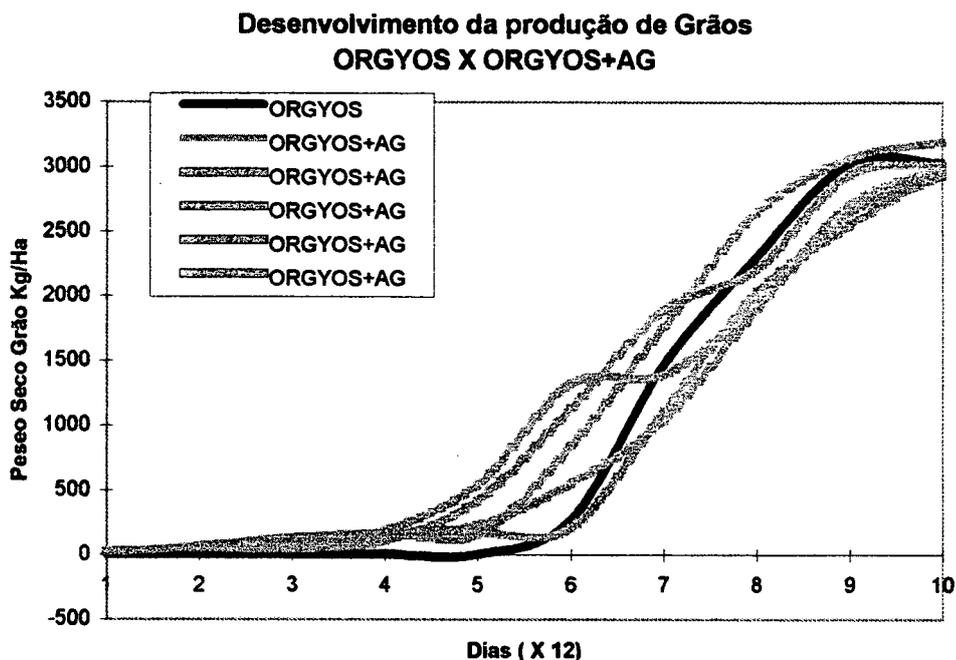


Gráfico 35: Comparação do desenvolvimento do grão da soja na condição irrigado entre os modelos ORGYOS e ORGYOS+AG.

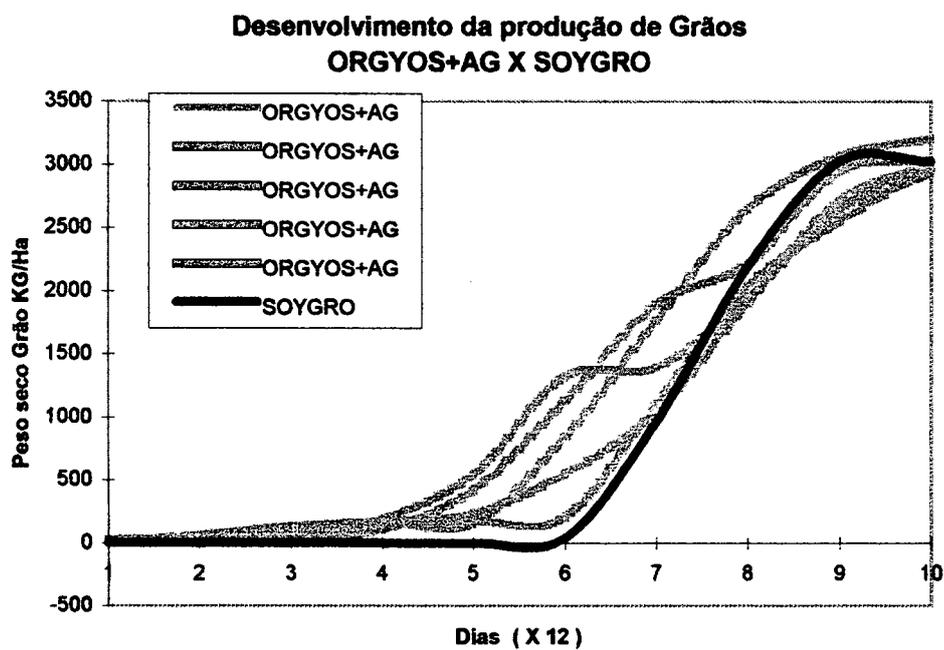


Gráfico 36: Comparação do desenvolvimento do grão da soja na condição irrigado entre os modelos SOYGRO e ORGYOS+AG.

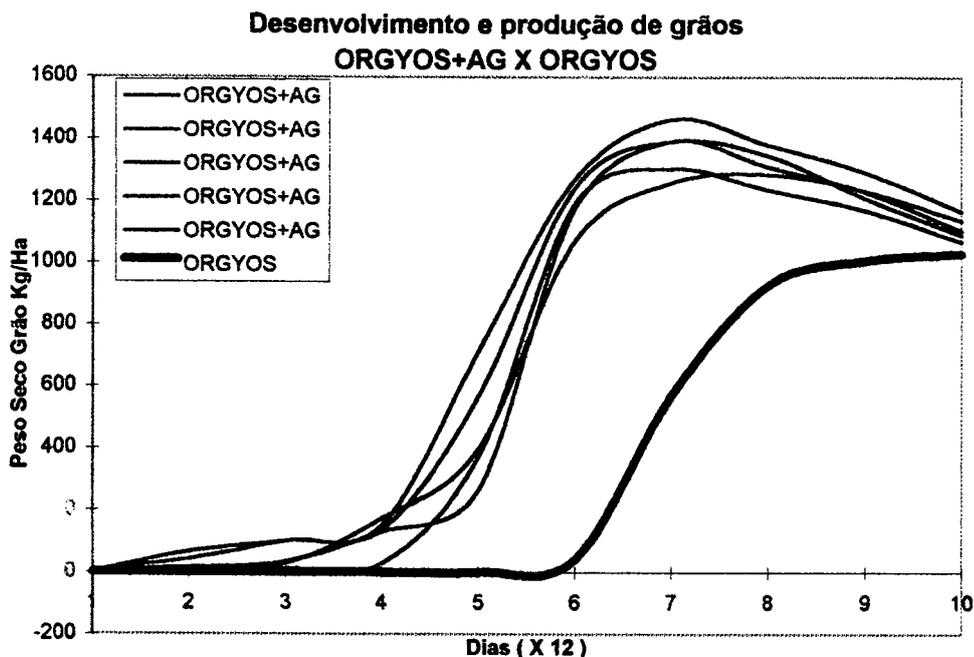


Gráfico 37: Comparação do desenvolvimento do grão da soja na condição de estresse hídrico entre os modelos ORGYOS e ORGYOS+AG.

#### 4.4 Análise dos Resultados.

A análise dos resultados alcançados encontram-se divididas em alguns tópicos que serão discutidos separadamente.

##### Horizonte de Planejamento.

Este tópico concentra-se na seguinte questão:

Atualmente existem duas visões sobre o comportamento das planta em relação as mecanismos internos do particionamento. A primeira é uma suposição onde a planta através de sucessivas gerações carrega consigo uma capacidade de "previsão de ambiente" (estações de seca, chuva, frio etc...), reagindo de forma a maximizar sua sobrevivência ou produção de grãos conhecendo previamente o ambiente. Na segunda, não existe esta capacidade de prever o ambiente, assim sua reação é uma função do ambiente que se encontra, para maximizar também suas chances reprodutivas.

Segundo Iwasa et Roughgarden (1984) a primeira suposição tem uma vantagem do "benefício da informação", sendo o sucesso das plantas que contém a capacidade de prever o ambiente maior do que as plantas providas de uma otimização momentânea. Entretanto, apesar da aparente complexidade, a estrutura do sistema de crescimento da planta pode ser tal que a otimização diária biomassa (enfoque miópico) leve a resultados muito semelhantes à otimização global da produção (considerando o ciclo completo da planta). Sem dúvida esse tema ainda merece mais pesquisa.

Apesar de não ter sido formalmente explicitado, neste trabalho foi utilizada a hipótese do conhecimento do ambiente. Assim o comportamento resultante do modelo em situação de estresse hídrico (vide gráficos 29 a 34 e 35) pode ser típico de uma política buscando a maximização da produção, já que o período de estresse hídrico foi implementado na fase final do cultivo. Por outro lado, na situação irrigada em vista da condição "ótima" para o cultivo, não houve uma alteração grande na política do particionamento para a produção.

#### ◆ Descolamento das Curvas de Produção.

No tópico anterior foi colocada um possível explicação para a diferença de comportamento do desenvolvimento dos grãos entre os modelos ORGYOS e ORGYOS+AG. Outra possível explicação para o deslocamento da curva de produção para o caso do estresse hídrico pode ser analisada através do seguinte ponto de vista.

Pode-se esperar em um regime de estresse hídrico que a planta utilize uma parte maior de seu fotossintato disponível para as raízes. Assim possivelmente alterando a produção esperada.

O desvio observado de 11.34 a 13.88% (tabela 5) para mais na produção do modelo ORGYOS+AG em relação a produção do modelo ORGYOS, pode ser proveniente desta não substituição, já que no algoritmo implementado houve uma fixação dos coeficientes de partição destinados a raiz.

Caso fossem inseridas as restrições de proporção raízes/copa seria esperado que os resultados obtidos no modelo ORGYOS+AG fossem superpostos ao modelo ORGYOS. Assim sendo, parte deste descolamento foi explicado através dos pontos ressaltados nos tópicos anteriores. Claro que estas conclusões são provisórias, dentro do tema a partir de uma base formada na literatura da área.

♦ Considerações sobre a biomassa.

De acordo com Velten et Ritcher (1995) as seguintes hipóteses (função objetivo) de otimização: de maximização de frutos não é alterada quando comparada com o critério de maximização de biomassa total. Significa dizer que o caminho ótimo para produção de frutos provavelmente passaria pelo caminho ótimo para produção de biomassa no período vegetativo.

Analisando os resultados obtidos através dos modelos ORGYOS e ORGYOS+AG quanto a este aspecto foi verificado que: inicialmente para ambas condições o acúmulo de biomassa foi sensivelmente menor para o modelo ORGYOS+AG. Para esta diferença existe um aspecto principal que deve ser considerado. O aspecto relevante para esta diferença, pode ser apontado nos gráficos 32 e 33, como sendo o início da formação de grãos que inicia no dia 72 (6 (x12)) no modelo ORGYOS, enquanto que este início da formação de grãos no modelo ORGYOS+AG encontra-se livre. Consequentemente o fotossintato que estaria

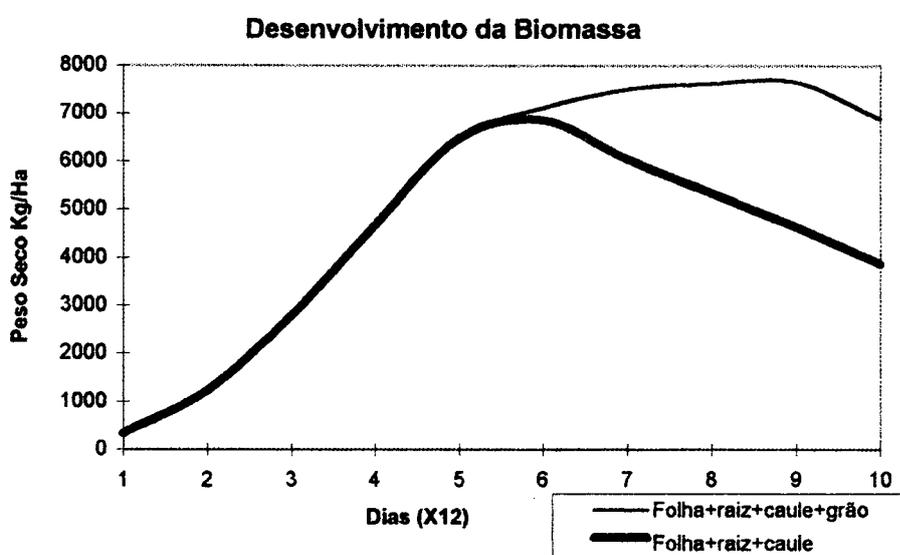


Gráfico 38: Desenvolvimento da biomassa no modelo ORGYOS na condição irrigada.

disponível para o desenvolvimento da biomassa no período vegetativo foi utilizado para o desenvolvimento de grãos em um período anterior ao dia 72 do cultivo, retardando e diminuindo o desenvolvimento da biomassa. Neste ponto é importante mencionar que a conversão do fotossintato para grãos é bem menos eficiente que a conversão do fotossintato para as partes vegetativas, proporcionando um custo que se refletiu no menor acúmulo de biomassa (vide gráficos 38 a 41).

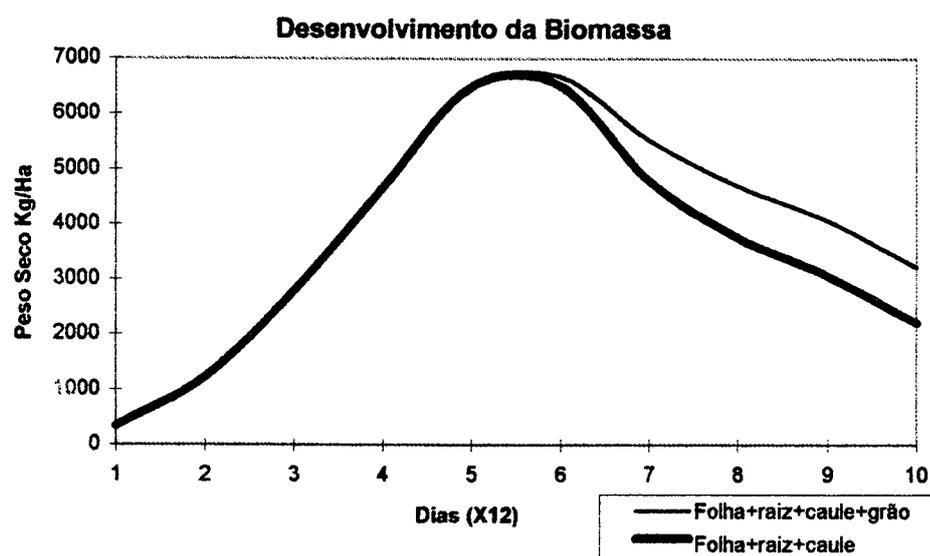


Gráfico 39: Desenvolvimento da biomassa no modelo ORGYOS na condição de estresse hídrico.

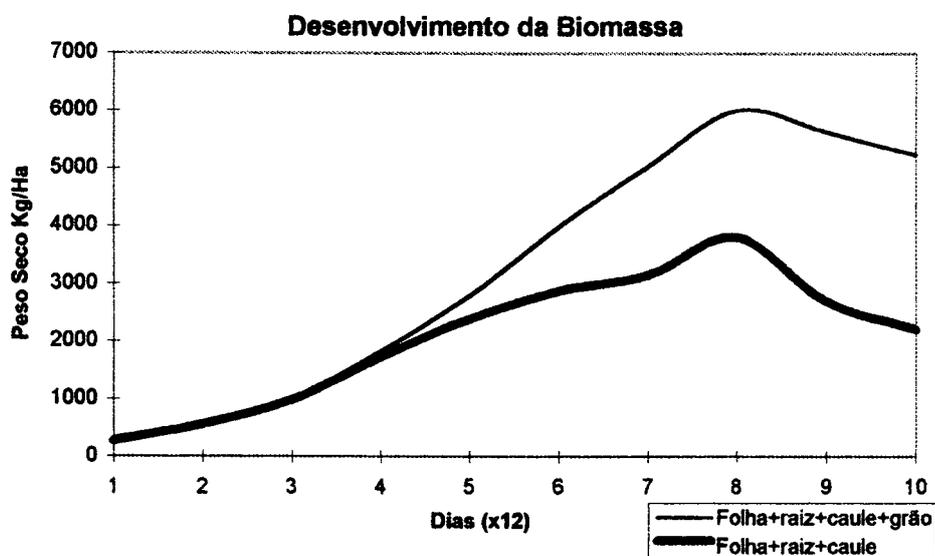


Gráfico 40: Desenvolvimento da biomassa no modelo ORGYOS+AG na condição irrigada.

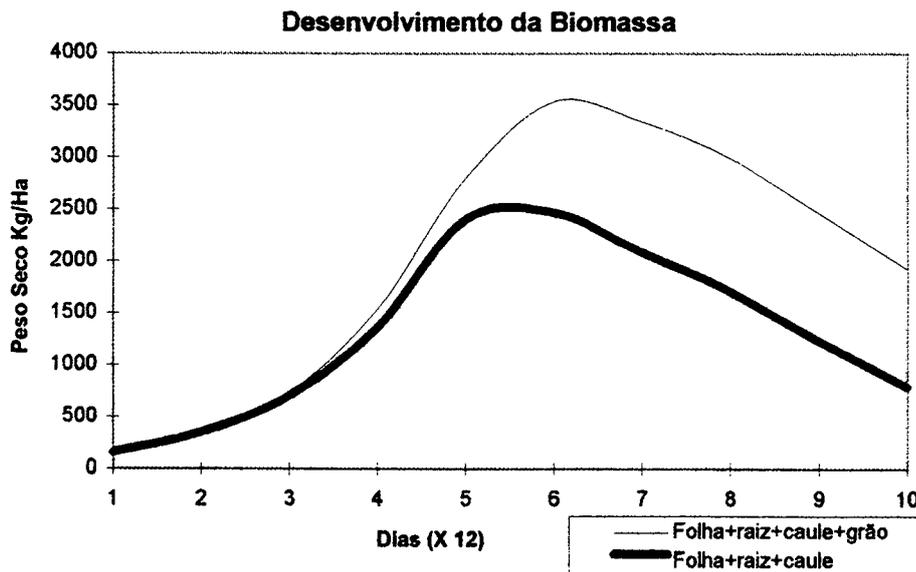


Gráfico 41: Desenvolvimento da biomassa no modelo ORGYOS+AG na condição de estresse hídrico.

Outro ponto a ser considerado sobre a colocação de Velten et Ritcher (1995) reside no seguinte fato. Allen et al (1991) avaliaram a alocação da matéria seca da soja alterando a concentração de  $\text{CO}_2$ . Na concentração superior (990 mol de  $\text{CO}_2$ /mol ar), obteve-se uma produção de biomassa de 67% maior que na concentração padrão (330). No entanto a produção de sementes foi de somente 47% maior que a padrão.

Em uma comparação entre estes dois pontos mencionados sobre os trabalhos de Allen et al (1991) e Velten et Ritcher (1995), percebe-se uma contradição quando comparamos o aumento da biomassa com o aumento da produção de sementes. Em uma análise rápida, deveria ser esperado que a produção das plantas na concentração maior de  $\text{CO}_2$  alcançasse valores mais próximos de 67%, pois esta foi a diferença no aumento da biomassa. No entanto sua produção de sementes foi de somente 47% maior que a padrão. Verifica-se que existe aqui um contraste entre um modelo teórico de Velten et Ritcher (1995) e uma constatação empírica de Allen et al (1991), sugerindo que outras pesquisas sejam feitas neste sentido.

## CAPITULO V

---

### 5.1 Considerações iniciais

Georgescu-Roegen (1971) compara a evolução da Ciência com os organismos vivos que crescem e evoluem. A gênese deste "organismo" ocorreu no primeiro momento em que o instinto do homem explorou o ambiente. Desta pesquisa surgiu o conhecimento, o qual mais tarde, infelizmente (como o próprio Georgescu-Roegen menciona), se traduziu em poder nas tribos e sociedades. Consequentemente tornando a vida mais fácil para aqueles que possuíam o conhecimento de inferir sobre o ambiente.

A partir deste momento, o homem começou a agregar conhecimento dos indivíduos em uma comunidade, e sentiu a necessidade de preservá-lo de geração a geração. Assim a Ciência atingiu sua primeira forma e se tornou um "ser".

O instinto animal de aprender não era o suficiente para uma sociedade evoluir. Uma sociedade tinha também que desenvolver o instinto de utilidade para separar e conservar os bons conhecimentos, e em seguida torná-los comuns para sua evolução. Com este desenvolvimento, tipicamente Darwiniano, onde os conhecimentos mais úteis sobrevivem, a ciência prosseguiu tomando suas diferentes formas. A prova disto é que, diferentes culturas e seus conhecimentos sobrevivem até hoje.

Observa-se que, realmente, a evolução da ciência teórica se assemelha a evolução de um organismo vivo. Assim como os vários tipos de vida surgiram da matéria inerte e posteriormente evoluíram, a ciência também emergiu de uma estrutura amorfa, se organizou taxonomicamente e evoluiu. A ciência se reproduz porque uma proposição passada é redescoberta, e cresce porque a partir desta redescoberta, com fundamento, novas proposições são criadas. Ela também preserva sua essência, porque quando uma contradição destrutiva invade seu corpo, uma série de fatores são automaticamente disparados para se livrar do invasor.

No presente trabalho, buscou-se criar a partir de artigos e proposições valiosas, mais uma geração do que conhecemos como ciência. Apesar da visão limitada sobre a evolução da ciência apresentada, as idéias sobre crescimento, reprodução e evolução foram utilizadas como base para se resolver uma parte do problema proposto.

## 5.2 Conclusões e Sugestões

O modelo implementado neste trabalho, buscou verificar se a produção de um vegetal ao final de uma estação pode ser entendida com resultado de um processo de otimização. Com este fim, foi necessário especificar o sistema. Obviamente este processo de especificação do sistema carregou uma concepção particular do tema, que foi formada pelos vários assuntos revisados na literatura. Assim pelo ângulo de visão adotado, alguns aspectos referentes aos modelos de simulação de cultivos não foram considerados, quer pela própria extensão e peculiaridades do tema, quer pelas dificuldades de obter o material específico necessário.

No decorrer deste capítulo serão apresentados conclusões dos resultados obtidos através do modelo ORGYOS+AG. Para isto serão divididos em alguns tópicos sobre o tema abordado, e finalmente apresentadas sugestões para futuras pesquisas limitações do trabalho.

### ♦Qualidade do Resultado

O resultado final desta "simulação otimizada" pode ser observado na Tabela 5, ressaltando que a qualidade deste resultado encontra-se amarrada ao modelo ORGYOS emulador do SOYGRO. Entretanto apesar desta dependência, a média dos resultados gerados pelo modelo ORGYOS+AG distanciaram-se entre 2% a 13% do que foi considerado observado (Modelo ORGYOS ou SOYGRO) vide tabela 5. **Assim não pode-se descartar a idéia de otimização na distribuição do fotossintato.**

Resumindo este item, verifica-se que através das trajetórias de desenvolvimento das partes do vegetal calculadas pela otimização do AG, levam a coeficientes de

particionamento diferentes do modelo ORGYOS, mas no entanto, o resultado final (produção) desta otimização não pode ser considerado diferente do modelo ORGYOS.

#### ♦ Sistemas Livres

Na especificação de um sistema de simulação de cultivos, existem restrições, que podem ser classificadas entre restrições fortes ou fracas e condições obrigatórias. Uma condição obrigatória neste sistema foi, por exemplo, verificar se o fotoassimilado distribuído não excedeu o fornecimento do mesmo. Uma restrição considerada "fraca" neste sistema foi, por exemplo, a utilização do horizonte de cultivo (aproximadamente 120 dias), isto é, na avaliação de cada indivíduo na população do AG, esta restrição foi utilizada somente uma vez para cada indivíduo. Este tipo de restrição permitiu que qualquer cromossoma formado no início e durante o processo de "evolução" fosse uma solução viável do problema de otimização.

Por outro lado este trabalho não induziu o resultado obtido através de restrições fortes. Restrições fortes no problema abordado, seriam aquelas utilizadas a um nível diário ou periódico na avaliação de cada indivíduo, ou seja, ela atuaria no indivíduo de uma forma intensa. Este tipo de restrição limita o espaço de busca no AG, já que nem todos os indivíduos gerados aleatoriamente fariam parte de um conjunto de soluções viáveis para o problema. Obrigatoriamente forçando o caminho da solução para algum ponto mais determinado.

Como exemplo de restrições fortes podem ser citados:

*Proporção de Peso Seco Caule/ Peso Seco Folhas ou Copa/Raízes (root/shoot).* - Este tipo de proporção é utilizado em alguns modelos: Johnson et Thornley (1987), Schulze et al (1983), Robinson (1987) e outros. Apesar de não ter sido inserindo-se uma restrição deste tipo no sistema, dependendo dos limites inferiores e superiores impostos, estaríamos colocando o caminho da otimização em um tipo de "trilho". Considerando esta restrição o resultado final (produção de grãos) provavelmente seria em torno do encontrado, e talvez até mais rápido. Provavelmente, o desenvolvimento das outras partes vegetativas seria mais coerente com a realidade (SOYGRO).

No entanto, discussão é importante pois, com a entrada desta restrição no sistema estaríamos admitindo um desconhecimento sobre o que controla o particionamento do fotossintato. E conseqüentemente prejudicando a proposta inicial da averiguação de um procedimento otimizado para distribuição do mesmo.

*Fases Fenológicas* - As mudanças de fases fenológicas dentro do modelo ORGYOS e SOYGRO determinam mudanças no particionamento. A principal mudança encontra-se na passagem da fase vegetativa para reprodutiva, sugerindo que a planta passe a alocar todo fotossintato produzido para os grãos. A nível de modelos simulação esta condição determina uma restrição forte para o sistema, pois novamente estaria sendo feito um controle rígido no momento (quando) em que se deveria alocar o fotossintato para os grãos e também quanto .

No modelo implementado, ORGYOS+AG esta restrição não foi considerada, assim verificou-se que o início do enchimento de grãos nem sempre corresponde com a realidade (SOYGRO) (vide os gráficos 29 a 31). Entretanto pode-se verificar pelos gráficos 29 e 30 que existe um comportamento similar no caso irrigado, principalmente no Gráfico 29 onde a comparação da trajetória é feita nos modelos ORGYOS e ORGYOS+AG.

Entretanto na situação de estresse hídrico (gráfico 30), apesar de não ocorrer esta semelhança de comportamento, houve uma diferença na produção mais pronunciada, vide tabela 5. Por outro lado, o desvio das trajetórias na condição de estresse hídrico no final do período, pode ser observado como um indicador para a utilização de uma espécie precoce , ou seja, de ciclo mais curto elevado a produção para esta condição.

Finalmente pode-se concluir que, a medida que se impõe restrições fortes no modelo aumentam-se as possibilidades de se obter resultados mais coerentes no o desenvolvimento das partes das plantas. Por outro lado, ficamos mais longe de verificar o mecanismo de controle do particionamento.

#### ♦ Processo de Otimização

Como verificado pelos gráficos no capítulo anterior, ficou evidenciado pelo processo de produção analisado que existem muitas trajetórias sub-ótimas que levam a aproximadamente a mesma produção quando não se aplicam várias restrições

Apesar desta evidencia, sobre o ponto de vista de otimização do processo, observando a média de produção dos indivíduos das populações durante as 400 gerações de; 800 Kg/Ha para soja na condição irrigada e 400 Kg/Ha para soja na condição estresse hídrico, e o resultado final alcançado (3105 Kg/Ha e 1148 Kg/Ha respectivamente), pode-se concluir que este resultado é fruto de uma otimização. Deve-se também lembrar que o AG não garante a convergência ao ponto ótimo global, mas assim como na simulação discreta, o AG permite chegar em torno do ótimo ou casualmente no ótimo.

#### ♦ Sugestão quando ao Horizonte de Otimização.

Segundo Iwasa et Roughgarden (1984) existem duas hipóteses a serem verificadas: A primeira onde a planta, através de sucessivas gerações, carrega consigo uma capacidade de "previsão de ambiente", reagindo de forma a maximizar sua sobrevivência ou produção de grãos conhecendo previamente o ambiente. Na segunda, não existe esta capacidade de prever o ambiente, assim sua reação é uma função do ambiente em que se encontra para maximizar também suas chances reprodutivas.

Partindo deste dois pontos de observação, coloca-se uma sugestão de avaliar-se este problema através dois modelos de teóricos de crescimento e produção otimizada, um a nível diário, e outro supondo o conhecimento prévio do ambiente.

Apesar desta colocação de Iwasa et Roughgarden (1984) ter seu mérito, principalmente quanto a questões dentro da Pesquisa Operacional. Segundo Brockington (comunicação pessoal) *"parece difícil imaginar a adaptação somente em termos das reações imediatas, no dia a dia, descartando uma parte significativa da história da seleção da planta, em relação ao ciclo anual do clima. ...Contudo, parece que não há razão de supor que tais*

*ações sejam exclusivamente em resposta a estímulos imediatos.*” Enfim estas alternativas não devem ser mutuamente exclusivas.

♦Sugestões quanto a função *fitness*

A velocidade de convergência de algoritmo genético depende em parte da força e do objetivo da função *fitness*. Neste caso particular, Van der Werf et al (1993) mencionaram que “Sempre que ocorrer competição entre espécies, a seleção natural vai provavelmente favorecer a espécie o de maior taxa de crescimento relativo RGR (Relative Growth Rate), que estiver perto do máximo possível para aquele ambiente.” Esta observação para o presente trabalho pode ser traduzida como: os indivíduos dentro do sistema genético, cuja representação do particionamento demonstrarem um alto RGR teriam melhores chances de sobrevivência. Este tipo de observação poderia levar a um particionamento ótimo do fotossintato aumentando a habilidade de competir pelos recursos que o ambiente pode oferecer.

A nível de espécies, outros fatores também seriam importantes como a taxa fotossintética da espécie, fatores de eficiência de conversão entre outros que são condições do problema. Sob o ponto de vista do crescimento o RGR é sem duvida um fator dominante. Morimoto (1993) utiliza como medida de “crescimento” (ou melhor aproveitamento dos recursos) o quociente: comprimento total da folha/diâmetro do caule, sendo um método destrutivo, facilitando experimentos no sentido de que o cálculo do RGR é um método destrutivo.

Por outro lado, segundo as idéias apresentadas por Bloom et al (1985), a produção de biomassa diária pode ser um bom indicativo de alocação ótima de recursos, que também é uma característica revelada pelo RGR, e por último, deve-se considerar as reservas como sendo um trunfo em ambientes pobres em recursos. Segundo Bloom et al (1985), “alocação é ajustada através de alterações na taxa de crescimento nas raízes ou copa em resposta ao estresse ambiental de forma a maximizar a eficiência de capturar mais fortemente recursos limitantes”. Este ganho de biomassa pode ser expresso como o resultado do ganho fotossintético líquido. Desta forma um dos objetivos dentro da função

fitness seria maximizar o ganho da fotossíntese líquida através da “estrutura” (quantidades de folhas raízes e caule) que a planta se encontra.

Outro aspecto importante na função fitness é que esta pode permitir a utilização de características diferentes para a melhor performance do AG. Primeiro devemos ter em mente que o objetivo da função fitness é principalmente atribuir valores aos indivíduos da população do AG. Com estes valores, os quais não necessitam necessariamente de unidades condizentes (como por exemplo Kg/Ha), devem pelo menos apontar que um indivíduo é melhor que o outro. No entanto, utilizando-se desta técnica, alguns cuidados básicos devem ser considerados:

- Como estamos avaliando diferentes atributos, devemos utilizar diferentes pesos em função da importância de cada atributo para a convergência do algoritmo.
- Verificar a ordem de grandeza dos atributos analisados não permitindo valores discrepantes. Caso contrário o algoritmo pode convergir para atributos de pouca importância mas no entanto com altos valores.

Desta forma poderíamos utilizar diferentes características de um vegetal atribuindo um valor de sobrevivência, e utilizando diferentes características como: RGR, fotossíntese líquida, produção de sementes, índice de colheita (harvest index) e outros. Nesta concepção existe ainda um problema: O momento dentro do horizonte de cultivo que um o outro atributo deveria ter seu peso aumentado ou diminuído. Isto por que, até antes da fase reprodutiva alguns atributos como fotossíntese líquida e/ou RGR são de interesse. Já na fase reprodutiva outros atributos são de maior interesse.

Portanto como sugestões a nível de avaliação diária, seriam interessantes: RGR, fotossíntese líquida. A nível de avaliação ao final do ciclo, índice de colheita, fotossíntese líquida. A nível de avaliação de ecossistemas, a taxa fotossintética da espécie e fatores de eficiência de conversão do fotossintato na espécie.

#### ♦ Sugestão sobre modelos de adaptação e otimização

A aplicação da hipótese do particionamento otimizado basicamente teve o objetivo de verificar como uma planta faz a distribuição do material sintetizado buscando otimizar sua produção. Outros trabalhos tem demonstrado que as plantas tendem a se adaptarem a várias alterações das condições ambientais (Silvius, Johnson et Peters 1977; Brouwer 1977; Chartterton et Silvius 1979 e Robinson 1986). Estas adaptações são por sua vez alterações nos coeficientes de particionamento. A sugestão parte do principio de verificar se a planta altera os coeficientes de particionamento buscando se adaptar para otimizar sua produção. No entanto para isto seria necessário uma função de fotossíntese líquida que relaciona-se as partes do vegetal (folhas, caule, raízes) com os insumos disponíveis do ambiente.

Isto significa por exemplo que: insumos como água e nutrientes que são captados pelas raízes fazem parte na produção do fotossintato. Apesar de raras, estas relações podem ser encontradas em Van Keulen et Wolf (1979), descrevendo relações entre a produção fotossintética em relação ao peso seco de raiz ou superfície radicular com a disponibilidade de insumos (água e nutrientes).

#### ♦ Recomendações finais

Existe ainda outras possibilidades a serem exploradas com a hipótese utilizada neste trabalho. Entre elas podem-se citar: outras condições de ambientes e outras espécies vegetais. Não devendo ser esquecido que a obtenção de dados reais do ambiente e do vegetal, são em geral fatores limitantes para o encaminhamento de tal possibilidades.

### 5.3 Limitações

Neste trabalho existiram duas limitações básicas em termos da modelagem do sistema ambiente-planta. A primeira descrita anteriormente no item sugestões sobre modelos de adaptação e otimização. A segunda novamente faz referência a parte água-raízes.

Quando incluído o procedimento de captação da água disponível no solo através da leitura de dados do arquivo gerado pelo SOYGRO, foi deixado de lado o componente água que além de alterar o comportamento do sistema, ao mesmo tempo é afetado pelo próprio sistema. Isto porque há uma interação entre o balanço hídrico do solo e o desenvolvimento e uso da água pela planta. Sob um forma geral, a modelagem atual não permitiu um “feedback loop” inerente ao sistema, sendo esta uma das principais limitações do trabalho.

### Referências Bibliográficas

- Allen L. H., Bisbal E. C., Boote K. J., Jones P. H.** Soybean dry matter allocation under subambient and superambient levels of carbon dioxide. *Agronomy Journal* v.83 sep-oct: p.875-883, 1991.
- Baker C. H., Horrocks R. D.** CornMod, a dynamic simulator of corn production. *Agricultural Systems* n.1, p. 57-77,1976.
- Bloom A. J., Chapin III F. S., Mooney H. A.** Resource limitation in plants - an economic analogy. *Ann. Rev. Ecol. Syst.* 1985 16: 363-392.
- Bogges W. G.** Discussion: Use of biophysical simulation in production economics. *Southern Journal of Agricultural Economics.* p. 87- 89, July 1984.
- Boote K. J.,** Training Program on Computer Simulation for Crop Growth and Nutrient Management. May 1993, Muscle Shoals Alabama. No prelo.
- Boote K. J., Kirkham M. B., Allen L. H. and Baker J. T.** Effects of temperature, light, and elevated CO<sub>2</sub> on assimilate allocation . No prelo.
- Brouwer R.** Root functioning In: *Environmental effect on crop physiology.* 1977 ed by J. J. Landsberg and C. V. Cutting Academic press 229-245. 388p.
- Brouwer R.** Distribution of dry matter in plant. *Neth. J. Sci.* v. 10, N5 Special Issue, 1962.
- Brockington N. R.** *Computer modeling in agriculture.* Oxford University Press 1979, 154 p.
- Chambers L.** *Practical Handbook of genetic algorithms: applications, volume 1.* Edited by CRC press. Inc. 450 p. 1995.
- Chartterton N. J., Silvius J. E.,** Photosynthate partitioning into starch in soybean leaves. *Plant Physiol.* 1979 64, 749-753.
- Davidson R. L.** Effect of root/leaf temperature differentials on root/shoot ratios in some pasture grasses and clover. *Ann. Bot.* 33, 561-569, 1969.
- Dillon J. P., Anderson J. R.** *The analysis of response in crop and livestock production .* Pergamon Press, 251p., 1990.
- Evans L. T.** Crop evolution, adaptation and yield. Cambridge University press 1993 1st ed. 500 p.
- Fishman S. Talpaz, Winograd R., Dinar M., Arazi Y., Rosoman and Varshavski S.,** Model for simulation of potato growth on the plant community level. *Agricultural Systems* ,n. 18, p. 115-128, 1985.

- Flinn J. C.** The simulation of crop irrigation systems. In: *System Analysis in Agricultural Management*, Australia:John Wiley & Sons, 1971.
- Georgescu-Roegen N.** *The Entropy Law and Economic Process*, Harvard University Press 1971.
- Georgescu-Roegen N.** Process analysis and the neoclassical theory of production., *Am. J. of Agr. Econ.*, v. 54 N. 2 May p. 279-294,1972.
- Goldberg D. E.**, Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning, Addison-Wesley Publishing Company, p.401, 1989.
- Griffith B., Dingkuhn M, Schnier F., Coronel V., Akita S.** A simulation modelo for the dynamics of rice growth and development: III Validation of the model with high-yield varieties. *Agricultural Systems* 36, p. 329-349, 1991.
- Grimm S. S., Jones J. W., Boote K. T., Hesketh J. D.** Parameter estimation for predicting flowering date of soybeans cultivars, *Crop Science*, vol 33 Jan. Feb. 137-144, 1993.
- Grimm S. S., Jones J. W., Boote K. T., Hesketh J. D. and Herzog J. D.** Modeling the occurrence of reproductive stages after flowering for four soybeans cultivars. *Agron. J.* 86:31-38 1994.
- Heady E. O. and Dillon J. L.** *Agricultural Production Functions*. Iowa State University, Press 667 p. 1961.
- Iwasa Y., Roughgarden J.** Shoot/root balance of plants: Optima growth of a system with many vegetative organs. *Theor. Pop, Biol.* 25, 78-105, 1984.
- Jain P. G., Laing D. R.** Simulation of the phenology of soybeans. *Agricultural Systems*, n. 3, p. 295- 311, 1978.
- Jonhson I. R.** PLANTMOD 2.1 Exploring the physiology of plant communities. Greenhat Software 1994, Australia.
- Johnson I. R., Thornley J. H. M.** A model of shoot:root partitioning with optimal growth. *Ann. Bot.* 60 133-142, 1987.
- Leopold A. C., Kriedemann P. E.** *Plant growth and development*, MacGrawll-Hill Book Company, ed. 2, 545p, 1975.
- Margarita S.**, The towers of Hanoi: A new approach. *AI Expert*, Mar. p. 22-27,1993.
- McKinion J. M.** Dynamic simulation: A positive feedback mechanism for experimental research in the biological science, *Agricultural Systems* ,n. 5, p. 239-250, 1980.

- Mooney H. A. et Gulmon S. L. March**, Constraints on leaves structure and function in reference to herbivory. *BioScience* 32 n.3 198- 206, 1982.
- Monsi, M. et Murata Y.** Development of photosynthetic systems as influenced by distribution of matter. in I Setlik[ed.], Prediction and measurement of photosynthetic productivity, 115-129. PUDOC, Wageningen 1970.
- Morimoto T., Takeuchi T., Hashimoto Y.** Growth optimization of plant by means of the hybrid system of genetic algorithm and neural network. *Proceedings of 1993 International Joint Conference on Neural Network* . p. 2979-2982.
- Orians G. H., Solbrig O. T.**, A cost-income model of leaves and roots with special reference to arid and semiarid area. *American naturalist* 1977, vol 111 p.677- 690.
- O'Callgham J. R., Hossain A. H. M. S., Dahab, Wyseur G. C. L.** SODCOM: a solar driven computational model of crop growth. *Computer and electronic in agriculture* 11:293- 302, 1994.
- O'Leary G. J., Connor D. J., White D. H.** A simulation model development, growth and yield of the wheat crop. *Agricultural Systems* n. 17, p. 1-6,1985.
- Penning de Vries F. W. T. and van Laar H. H.** Simulation of plant growth and crop production, Centre for Agricultural Publishing and Documentations, Wageningen. the Netherlands 1982, 308 p..
- Robinson D.** Compensatory changes in the partitioning of dry matter in relation to uptake and optimal variations in growth. *Annals of Botany* 58, 841- 848, 1986.
- Schulze E. D. , Schilling K. et Nagarajah S.** Carbohydrate partitioning in relation to whole plant production and water use of *Vigna Unguiculata* (L). *Walp. Oecologia* 58, 169- 177, 1983.
- Sequera R. A., Olson R. L., Willers J. O., McKinion J. M.**, Automating the parametrization of mathematical models using genetic algorithms. *Computer and Electronics in Agriculture*. 11 p. 265-290, 1994.
- Salisbury F. B.** *Plant physiology*, Belmont, Wadsworth Publisher, 1978.
- Silvius J. E., Johnson R. R. and Peters D. B.** Effect of water stress on carbon assimilation and distribution in soybean plants at different stages of development. *Crop Science*, v 17 sep-oct, p. 713-716, 1977.
- Sumida B. H., Houston A. L, McNamara J. M., and Hamilton W. D.**, Genetic algorithms and evolution, *J. Theor. Biol.* n. 147, p. 59-84, 1990.
- Thornley J. H. M.**, Research strategy in the plant sciences. *Plant, Cell and Environment* (1980) 3, 233-236

- Thorton P. K., Dent J. B., Bacsi Z.** A framework for growth simulation model applications., *Agricultural Systems* , n. 37, p. 327- 340, 1991.
- Tsuji G. Y., Uehara G. and Balas S.** (eds). *DSSAT V3*. (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) University of Hawaii, Honolulu, Hawaii. 1994.
- van der Werf A., Visser A. J., Schieving F. and Lambers H.** Evidence for optimal partitioning of biomass and nitrogen availabilities for a fast- and slow- growing species. *Functional Ecology* 1993, 7,63-74.
- Velten K., Richter O.** 1995 Optimal root/shoot of carbohydrate in plants. *Bull Math. Biol.* 57 n.1, pp 99-107.
- Wilkerson G.G., Jones J. W., Boote K. J. , Ingram K. T., Mishoe J. W.** Modeling soybean growth for crop management . *Transactions of the ASAE* (American Society of Agricultural Engineers) p. 63 - 73, 1983.
- Wong S.-L.** Simulated optimal structure of a photosynthetic system: implication for the breeding of forest crop ideotype. *Can. J. For. Res.* 23: 1631-1638,1993.
- Yamagata M., Kouchi H., Yoneyama T.** Partitioning and Utilization of photosynthate produced at different growth stages after anthesis in soybean (*Glycine max* L. Merr.): Analysis by long term <sup>13</sup>C-Labeling experiments. *Journal of Experimental Botany* Vol 38, n. 193, p. 1247-1259, August 1987.
- Zeevaart J. A. D.** Regulation of assimilate partitioning. In:*Partitioning of Assimilates*, Sumary reports of a workshop held at Michigan State University, East Lansing, Michigan, May 1979. p. 14 - 17.

#### **Bibliografia Recomendada**

- Acock B., Acock M. C.** Potential for using long term field research data to develop and validate crop simulators. *Agron. J.* v.,83 p. 56-61, 1991.
- Aloni B., Pashkar T., Karni L.** Nitrogen supply influences carbohydrate partitioning of pepper seedlings and transplant development. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 116 (6): 995-999. 1991.
- Baker C. H., Curry R. B.** Structure of agriculture simulators: a philosophical view., *Agricultural Systems* n.1, p. 202-218, 1976.
- Beevers H.** Regulation of carbohydrate partitioning In: Heath R. Preiss J. - Regulation of Carbon Partitioning in Photosynthetic Tissue, Symposium in Plant Physiology (8th, 1985 University of California Riverside) p.367 - 369, 1985.
- Bunce J. A.** The effect of carbon dioxide concentration on respiration of growing and mature of soybean leaves. *Plant, Cell and Environment*, 18, 575-581, 1995.

- Caswell H., Koenig H. E., Resh J. A., Ross Q.** An introduction to systems science for ecologist. In: *Systems Analysis and Simulation in Ecology*, London: Academic Press, V.2 1972.
- Charles-Edward D. A., Doley D., Rimmington G.**, *Modeling plant growth and development*. Academic press 1986, 235p.
- de la Maza M., Yuret D. D.** Dynamic hill climbing." *AI Expert*, March p. 26-31, 1994.
- Fishman S. et al**, A phenomenological model of dry matter partitioning among plant organs for simulation of potato growth. *Agricultural Systems*, n. 14, p.159-169, 1984.
- Fondy B. R. and Geiger D. R.** (1980) Effect of rapid changes in sink-source ratio on export and distribution of products of photosynthesis in leaves of *Beta vulgaris* and *Phaseolus vulgaris* L. *Plant Physiol.* 66:945-949.
- Gutierrez A. P., Mariot E. J., Cure J. R., Riddle C. S. W., Ellis C. K. and Villacorta A. M.**, A model of (*Phaseolus vulgaris* L.) growth types I-III: factors affecting yield, *Agricultural Systems*, n.44, p. 35-63, 1994.
- Gifford R. M., Thorne J. H., Hitz W. D., Gianquinta R. T.** Crop productivity and photoassimilate partitioning. *Science* vol 225, 24 august 1984, p. 801-807.
- Gulmon S L. and Chu C. C.** The effects of light and nitrogen on photosynthesis, leaf characteristics, and dry matter allocation in the Chaparral Shrub, *Diplacus aurantiacus* 1981 *Oecologia* 49:207-212.
- Grant R. F.** Interactions between carbon dioxide and water deficits affecting canopy photosynthesis: Simulation and testing. *Crop Science* 32: 1322-1328, 1992.
- Hall D. O., Rao K. K.** *Photosynthesis*, Edward Arnold Publisher Ltd. 1975.
- Hanson A.** Plant Breeding and partitioning in cereals and grain legumes. In: *Partitioning of Assimilates*, Summary reports of a workshop held at Michigan State University, East Lansing, Michigan, p. 18 - 23, May 1979.
- Hikosaka K. and Terashima I.** A model of acclimation of photosynthesis in the laeves of C3 plants to sun and shade with respect to nitrogen use. *Plant, Cell and Environment* 1995 18 605- 618.
- Holland J.** *Adaptation in Natural and Artificial Systems. An introductory analysis with applications to, biology, control, and artificial intelligence*, Bradford Books edition, 207 p., 1992.
- Laurence J. A., Amundson R. G., Friend A. L., Pell E. J. and Temple P. J.** Allocation of carbon in plants under stress: An Anlysis of the ROPIS experiments. *J. Environ. Qual.* 23: 412 - 417, 1994.

- Levin S. A., Mooney H. A. , Field C.** The dependence of plant root:shoot ratios on internal nitrogen concentration. *Annals of Botany* 64, 71-75, 1989.
- Meyer R. F. et Boyer J. S.** Osmoregulation, solute distribution, and growth in soybean seedlings having low water potentials. *Planta* 151: 482-489, 1981.
- Prior S. A. and Rogers H. H.** Soybean growth response to water supply and atmospheric carbon dioxide enrichment. *Journal of Plant Nutrition*, 18(4), p. 671-636 (1995).
- Taiz L., Zeiger E.**, Plant Physiology, The Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc. 1991.
- Thomas B. R. and Griffin K. L.** Direct and indirect effects of atmospheric carbon dioxide enrichment on leaf respiration of *Glycine max* (L.) merr.. *Plant Physiology* 104, 355-361, 1994.
- van Keulen H. and Wolf J.** *Modeling agricultural production weather, soils and crops* Centre for Agricultural Publishing and Documentations, Wageningen. the Netherlands 1986, 478 p..

## ANEXO 1

```

Program teste; {orgyos +AG}
{CONSIDERA O PARTICIONADO PARA RAIZ JA FIXADO}
{ASSIM O VETOR PASSA A SER LCHROM *3}
{este programa utiliza algoritmo genetico simples, para particionar fotossintetizado
entre as partes do vegetal. As partes por sua vez, estão associadas a cada uma das linhas da
matriz que representa o cromossoma}

{$R+}
{$M 16384,0,655360}

uses
  wincrt,fotosint, global,tipos;

var
  oldpop, newpop      :population; { 2 popul. nao sobrepostas }
  popsize, lchrom, gen, maxgen :integer; { Vari veis globais inteiras }
  pcross, pmutation, sumfitness, pespecial :real; { Vari veis globais reais }
  nmutation, ncross    :integer; { Estatisticas inteiras }
  avg, max, min, average :real; { Estatisticas reais }
  filename             :string[8]; { Nome do arquivo de saida }
  buffer,buffer2,buffer3,buffer4 :text; { Arquivo de saida }
  saida, geracao       :integer;
  maximo, minimo       :real;
  pos,indice_Max,passo,max_gen : integer;
  INDI :INDIVIDUAL;

function flip(probability:real):boolean;
{Retorna um valor logico verdadeiro com probabilidade especificada,
de acordo com a distribuicao de Bernoulli.}
begin
  flip := (random <= probability);
end;

function rnd(low,high:integer):integer;
{
  Retorna um nUmero inteiro aleatOrio sorteado, com distribuicao equi-
provavel, tal que low <= rnd <= high.
}
begin
  if (low<high) then
    rnd := random(high-low+1)+low
  else
    rnd := low;
end;

Procedure Normaliza(Var chrom:chromosome);
Var
  Sch,i,INDICE_Resto : integer;
Begin
  for i:=1 to lchrom do
  Begin
    Sch := chrom[i] + chrom[lchrom + i] + chrom[lchrom*2 + i];
    If (Sch<>0) Then
    Begin
      chrom[i] := Trunc((chrom[i]*(100-vec_raiz[i])) Div Sch);
      chrom[lchrom + i] := Trunc((chrom[lchrom + i]*(100-vec_raiz[i])) Div Sch);
      chrom[lchrom*2 + i] := Trunc((chrom[lchrom*2 + i]*(100-vec_raiz[i])) Div Sch);

      RESTO := (100-VEC_RAIZ[i]) - (chrom[i] + chrom[lchrom+i] + chrom[lchrom*2+i]);
      Indice := rnd(0,2);
      chrom[lchrom*(indice) + i ] := chrom[lchrom*indice + i ] + Resto;
    End
  else Begin
    chrom[i] := 33;
    chrom[lchrom + i] := 33;
    chrom[lchrom*2 + i] := 34;
  end;
end;

```

```

    End;
  End;

End;

function objfunc(var chrom: chromosome):real;
var
  somacol1, somacol2, somacol3, j1 : integer;
  AUX: REAL;
{Retorna o valor da funcao objetivo - valor de producao}

begin

  OBJFUNC := Principal(chrom,lchrom);

end;

function select(popsiz:integer, sumfitness:real; var pop:population):integer;
{ NOTA : ESTA SELEÇÃO NÃO É ELITISTA
  Retorna o número de um individuo selecionado na população, sorteado em
  proporção ao valor do fitness deste individuo na população.
  Usado : implementar o operador de reprodução favorecendo os mais aptos.
  Parâmetros: popsize = tamanho da população;
              sumfitness = soma dos valores de adequação da população;
              pop = população de onde se far a seleção.
}
var
  rand, partsum: real;
  j,j1 : integer;
  aux : individual;
begin
  partsum:=0.0; j := 0;
  rand:=random*sumfitness;
  seek(pop,0);

  repeat
    read(pop,aux);
    j := j + 1;
    partsum := partsum + aux.fitness;
  until (partsum >= rand) or (j >= popsize) or (eof(pop));
  select := j;
end;

procedure mutation(var chrom : chromosome; pmutation:real;
  var nmutation:integer);
{Retorna o valor de mutação de um alelo. Distinto do original, quando
ocorre, ou o mesmo valor se não ocorre. Quando ocorre, incrementa o
contador de numero de mutações de 1.}

var
  mutate : boolean;
  j1 : integer;
  Sch : integer;
begin

for j1 := 1 to (lchrom*3) do
begin
  mutate := flip(pmutation);
  if (mutate) then
    begin { ocorre mutação; determina valor da partição do alelo mutado }
      nmutation := nmutation + 1;
      chrom[j1] := rnd(0,40);
    end;
end;
end;

procedure special (var chrom : chromosome);

```

{ Este procedimento é uma mutação especial trocando os valores das posições relativas do cromossoma, satisfazendo a condição de soma 100%}

```

var
  i, indice, aux : integer;
  esp : boolean;

begin
  for i := 1 to lchrom*3 do
    begin
      esp := flip(esp);
      if (esp) then
        for i := 1 to lchrom do
          begin
            indice := rnd (0,2);
            aux := chrom [lchrom * indice + i];
            chrom[ lchrom * indice + i ] := chrom[i];
            chrom [i] := aux;
          end;
        end;
      end;
    end;

  end;

  procedure crossover(var parent1, parent2, child1, child2 : chromosome;
    var lchrom, ncross, nmutation, jcross : integer;
    var pcross, pmutation:real);

  { copia os cromossomas pais para os cromossomas filhos, j realizando
  as eventuais procedimentos de mutação e o crossover, se hover.
  Parametros : parent1, parent2 : cromossomas pais (entrada);
  child1, child2 : cromossomas filhos (saida);
  lchrom : comprimento do cromossoma NO CASO FIXO 10(entrada);
  ncross : numero total de crossover (entrada/saida);
  nmutation : numero de mutações (entrada/saida);
  jcross : local onde se verifica o crossover (saida);
  pcross, pmutation : probabilidades de crossover e mutação(S); }

  var
    j : integer;

  begin
    if flip(pcross) then
      begin
        { ocorre o crossover }
        jcross := rnd(1,(lchrom*3)-1);
        ncross := ncross + 1;
      end
    else
      { nAo ocorre o crossover }
      jcross := lchrom*3;
    end;

    for j:= 1 to jcross do
      begin
        child1[j] := (parent1[j]);
        child2[j] := (parent2[j]);
      end;

    if (jcross < lchrom*3) then
      for j := jcross + 1 to lchrom*3 do begin
        child1[j] := (parent2[j]);
        child2[j] := (parent1[j]);
      end;
    end;

  end;

  procedure minmax(popsiz:integer ;
    var max, avg,min, sumfitness:real ;
    var pop : population);
  var j : integer;
  {inicialização}

```

```

aux :individual;
begin
seek(pop,0);
read(pop,aux);
Indice_Max:=1;

sumfitness:= aux.fitness;
min := aux.fitness;
max := aux.fitness;
j:=1;

read(pop,aux);
while (not eof(pop)) do
begin
j:=j+1;
with aux do begin
sumfitness := sumfitness +fitness;
if fitness > max then Begin
max := fitness; { novo maximo}
Indice_Max:=j;
End;
if fitness < min then min := fitness; { novo minimo}
end;
read(pop,aux);
end;
avg := sumfitness/popsize;

end;

procedure prescale(umax,umin,uavg:real; var a,b:real);
{calcula os coeficientes A e B para um escalonamento linear}

const fmultiple = 1.8; {fitness multiple pode estar entre 1.2 e 2 para pop de 50 a 100 ind}
var delta : real; {divisor}

begin
if (umin > (fmultiple *uavg - umax / (fmultiple - 1.0))) { teste de não negatividade}
then begin
delta := umax - uavg;
a := (fmultiple - 1.0)* uavg / delta;
b := uavg * (umax - fmultiple * uavg) / delta;
end
else begin {escalonamento maximo possivel}
delta := uavg - umin;
a := uavg / delta;
b := -umin * uavg / delta;
end;
end;

function scale (u, a, b:real):real;
{escala um valor da func obj}
begin
scale := a *u + b;
end;

procedure scalepop(popsize: integer; var max, avg, min, sumfitness :real;
var pop: population);
{escalonamento de toda população}
var j: integer;
a, b :real; { curvatura e interseção da função }
aux :individual;

begin

prescale(max, avg, min, a, b);{obtem a inclinação e o intercepto da função}
sumfitness:= 0.0;
j:=1;

seek(pop,0);
while ((j<=popsize) and ((not eof(pop)))) do

```

```

begin
  read(pop,aux);
  with aux do
    begin
      fitness := scale(fitness, a, b);
      sumfitness := sumfitness + fitness;
    end;
  write(pop,aux);
end;

end;

Procedure Pego_Melhor(var ant_pop:population;var pos_pop:population);
var
  indi:individual;
Begin
  seek(ant_pop,Indice_Max-1);
  read(ant_pop,indi);
  seek(pos_pop,0);
  write(pos_pop,indi);
End;

procedure generation;
{Cria uma nova geração newpop através de seleção, crossover, mutação,}
var
  j, j1, j2, mate1, mate2, jcross : integer;
  gamete1, gamete2 : individual;
  indiv_old1,indiv_old2,indiv_new1,indiv_new2,INDIV: individual;

begin
  Pego_Melhor(oldpop,newpop);
  j := 1;

  SEEK(OLDPOP,0);

  repeat { seleciona e gera gametas até que nova população esteja completa }
    { pega dois consortes = 1 casal }
    mate1 := select(popsiz, sumfitness, oldpop);
    mate2 := select(popsiz, sumfitness, oldpop);

    seek(oldpop, mate1);
    read(oldpop, indiv_old1);
    seek(oldpop, mate2);
    read(oldpop, indiv_old2);

    crossover(indiv_old1.chrom, indiv_old2.chrom,
              indiv_new1.chrom, indiv_new2.chrom,
              lchrom, ncross, nmutation, jcross, pcross, pmutation);

    mutation( indiv_new1.chrom, pmutation, nmutation);
    special ( indiv_new1.chrom);
    Normaliza(indiv_new1.chrom);
    mutation( indiv_new2.chrom, pmutation, nmutation);
    special (indiv_new2.chrom);
    Normaliza(indiv_new2.chrom);

    with indiv_new1 do
      begin
        fitness := objfunc(chrom);
        parent1 := mate1;
        parent2 := mate2;
        xsite := jcross;
      end;
    with indiv_new2 do
      begin
        fitness := objfunc(chrom);
        parent1 := mate1;
        parent2 := mate2;
        xsite := jcross;
      end;
  end;

```





```

        writeln(buffer3,chrom[j1], ' ',chrom[lchrom +j1], ' ',chrom[lchrom*2+j1]);
    end;
end;
end;

procedure salva_melhores( var buffer: text; geracao:integer; var pop:population);
var
    j,j1 : integer;
    indiv : individual;
begin
    writeln(buffer,'geracao ',geracao,' SumFit ',Sumfitness:0:2);
    seek(pop,0);
    read(pop,indiv);
    while not(eof(pop)) do
        Begin
            if geracao >= 1 then
                begin
                    with indiv do
                        begin
                            writeln(buffer,' fitness ', fitness:0:2);
                        end;
                    read(pop,indiv);
                end; {if}
            end; {eof}
        End;
    BEGIN

    Randomize;

    PMUTATION := 0.5;
    pcross := 0.9;
    pespecial := 0.1;
    POPSIZE := MAXPOP;
    SUMFITNESS:=0.0;
    average :=0;

    write(' Ingrese o Passo : '); readln(passo);
    write(' maximo de Geracoes: ');readln(max_ger);
    write(' Tamanho do Indiviuo: '); readln(lchrom);
    write(' Tamanho da Populacao: '); readln(popsize);

    assign(newpop,'newpop.out');
    rewrite(newpop);

    assign(oldpop,'oldpop.out');
    rewrite(oldpop);
    reset(oldpop);

    vec_raiz[1]:= 54;
    vec_raiz[2]:= 45;
    vec_raiz[3]:= 24;
    vec_raiz[4]:= 16;
    vec_raiz[5]:= 16;
    vec_raiz[6]:= 13;
    vec_raiz[7]:= 0;
    vec_raiz[8]:= 0;
    vec_raiz[9]:= 0;
    vec_raiz[10]:= 0;

    {vec_relação e um teste}
    vec_relacao[1]:= 1.35;
    vec_relacao[2]:= 1.11;
    vec_relacao[3]:= 0.6;
    vec_relacao[4]:= 0.37;
    vec_relacao[5]:= 0.32;
    vec_relacao[6]:= 0.31;
    vec_relacao[7]:= 0.32;
    vec_relacao[8]:= 0.32;
    vec_relacao[9]:= 0.38;
    vec_relacao[10]:=0.43;

```

```
initpop;
assign(buffer2,'geracao.out');
rewrite(buffer2);
assign(buffer3,'cromoss.out');
rewrite(buffer3);
assign(buffer4,'Melhor.out');
rewrite(buffer4);

initreport(buffer);

geracao:=1;
REPEAT
  geracao := geracao + 1;
  generation;

  if ((geracao mod Passo) = 0) Then
  Begin
    makereport(buffer, geracao);
    makereportgeracao(buffer2,geracao);
    salva_cromossoma(buffer3, geracao,newpop);
    salva_melhores(buffer4, geracao,newpop);
  End;

  close(oldpop); close(newpop);
  assign(oldpop,'newpop.out');
  reset(oldpop);
  assign(newpop,'newpop.out');
  reset(newpop);

  writeln(geracao main ',geracao);

UNTIL (geracao >= max_ger);

Pego_Melhor(oldpop,newpop);
SEEK(NEWPOP,0);
READ(NEWPOP,INDI);
AVERAGE := Principal(INDI.chrom,lchrom);

writeln(buffer,'Fim do relatório. ');
close(buffer);
close(buffer2);
close(buffer3);
close(buffer4);
close(oldpop);
close(newpop);
END
```

```

unit fotosint;

interface

uses
  winclrt,tipos,global,Report, Partmec5;

function pgmax(par:real):real;
function func_lai(LAI:real):real;
function func_temp (temp_media:real):real;
function func_h2o (h2o_dispo:real):real;
function fotossintese(par,temp_media,h2o_dispo:real):real;
function Valor_dia_foto_Termal_R1(temp_media,comp_noite:real):real;
function Valor_dia_foto_Termal_R1_R5(temp_media,comp_noite:real):real;
function Valor_dia_foto_Termal_R5_R7(temp_media,comp_noite:real):real;
procedure Leio_Arquivos_ambientes(var total_valor_dia_foto_Termal, fotos_bruta:real;
  chrom:chromosome;lchrom:integer;VAR TOTAL_FOTO_LIQUIDA,TOTAL_PSfr:REAL);
Function Principal(chrom:chromosome;lchrom:integer):real;

implementation

const
  esp_linha = 76; {espaçamento entre linhas cm }
  esp_plantas = 2.8 ; {espaçamento entre plantas cm }

var
  contador_born :integer;

function pgmax(par:real):real;
var fotos:real;
{retorna uma produção max de fotos. entre 0 e 50 - unidade
g CH2O/dia - produzidas em função da PAR photossintetic active (radiation moles/ m2 /dia)}
begin
  if ((par >= 0) and (par <= 48.27)) then
    fotos := (1.67*par)- (0.0173*sqr(par))
  else
    fotos := 40.3;

  pgmax:=fotos;
end;

function func_lai(LAI:real):real;
{retorna um valor entre 0 e 1 em função do LAI}
var lai_aux:real;
begin
  if (LAI < 0.102) then
    lai_aux := lai;

  if (LAI >= 0.102) and (LAI <= 3.835) then
    lai_aux := (5.4 + (47.78*lai) - (6.23 * sqr(lai)))/100;

  if (LAI > 3.835 ) then
    lai_aux:= 1 - exp(-0.9144* lai);

  func_lai:= lai_aux;
end;

function func_temp (temp_media:real):real;
{retorna um valor entre 0 e 1 em função da temp media}
var temp_aux:real;
begin
  if (temp_media < 13) then
    temp_aux := 0;

  if (temp_media >= 13) and ( temp_media <= 27) then
    temp_aux := ln((temp_media - 5)/8);

```

```

if (temp_media > 27) then
temp_aux := 1;

func_temp:= temp_aux;
end;

function func_h2o (h2o_dispo:real):real;
{retorna um valor entre 0 e 1 em função da disponibilidade de agua no solo}

var h20_aux: real;
begin

if (h2o_dispo < 0.045) then
h20_aux := 0.0; {deveria ser ZERO mas como a utilizacao de reservas anao esta
pronta vou colocar um valor bem baixo para dias de seca}

if (h2o_dispo >= 0.045) and (h2o_dispo <= 0.082) then
h20_aux := - 1.198 + (26.685*h2o_dispo);

if (h2o_dispo > 0.082) then
h20_aux := 1;

func_h2o:= h20_aux
end;

{function nitro:real; retorna um valor entre 0 e 1 em função do nitrogenio da folha
p o r e n q u a n t o n ã o i m p l e m e n t a d a}

function fotossintese(par,temp_media,h2o_dispo:real):real;
var erro :real; {12% de erro nas estimativas do modelo do Boote
segundo Boote seu erro era apenas 0.88}
begin
erro := 0.86;

fotossintese:= erro * pgmax(par) * func_lai(lai) * func_h2o(h2o_dispo) * func_Temp(temp_media) * 1 ;
{1 = fator nitrogenio}
{signinfica que nitrog. esta 100%}

{ Pg = gross photos. (g CH2O /dia /m2- este resultado é que vai
ser particionado depois da respiracao}

end;

Function Valor_dia_foto_Termal_R1(temp_media,comp_noite:real):real;
{ nessecita de 22 unidades termal acumuladas}

Var

Valor_thermal_R1,Calculo_taxa_Termal_aux,Calculo_taxa_fotoperiodo_aux :real;
Begin
valor_thermal_r1 := 0;
{nota: Tmedia representa a temperatura para calculo }
{nota2: as temperaturas min (2.44) e otimas (26.73) foram retiradas do trabalho de Grimm e
Boote 1994 Agronomy Journal em funcao da variedade de soja BRAAG que estou trabalhando}

if (Temp_media <= 2.44) then Calculo_taxa_Termal_aux := 0;

if (Temp_media >= 26.73) then Calculo_taxa_Termal_aux := 1;

if (( 2.44 < Temp_media ) and ( Temp_media < 26.73 )) then
Calculo_taxa_Termal_aux := (Temp_media - 2.44)/(26.73 - 2.44);

Calculo_taxa_Termal := Calculo_taxa_Termal_aux;

{Calculo_taxa_fotoperiodo representa valor de 0 a 1 em função do comprimento da noite
comp_Noite comprimento da noite em função da latitude e longitude e dia do ano}
{nota3: o comprimento da noite min (8.7) e otimas (11.25) foram retiradas do trabalho de Grimm e
Boote 1994 Agronomy Journal em funcao da variedade de soja BRAAG que estou trabalhando}

if (comp_Noite <= 8.70) then Calculo_taxa_fotoperiodo_aux := 0;

```

```

if (comp_Noite >= 11.25) then Calculo_taxa_fotoperiodo_aux := 1;
if (( 8.70 < comp_Noite )and ( comp_Noite < 11.25 )) then
Calculo_taxa_fotoperiodo_aux := (comp_Noite - 8.70)/(11.25 - 8.70);

Calculo_taxa_fotoperiodo := Calculo_taxa_fotoperiodo_aux ;

Valor_dia_foto_Termal_R1 := Calculo_taxa_Termal * Calculo_taxa_fotoperiodo;

{VALOR DIA FOTO TERMAL R1 = INICIO DO FLORECIMENTO
- NECESSITA DE 22 UNIDADES TERMAIS PARA INICIO DO FLORECIMENTO}
end;

Function Valor_dia_foto_Termal_R1_R5(temp_media,comp_noite:real):real;
{ nessecita de 15.01 unidades termiais acumuladas ( TEXTO GRIMM)}
Var

    Calculo_taxa_Termal_aux,Calculo_taxa_fotoperiodo_aux :real;
Begin
valor_Termal_r1_r5 := 0;
{nota: Tmedia representa a temperatura para calculo }
{nota2: as temperaturas min (2.15) e otimas (18.71) foram retiradas do trabalho de Grimm e
Boote 1994 Agronomy Journal em funcao da variedade de soja BRAAG que estou trabalhando}

if (Temp_media <= 2.15) then Calculo_taxa_Termal_aux := 0;

if (Temp_media >= 18.71) then Calculo_taxa_Termal_aux := 1;

if (( 2.15 < Temp_media )and ( Temp_media < 18.71 )) then
Calculo_taxa_Termal_aux := (Temp_media - 2.15)/(18.71 - 2.15);

Calculo_taxa_Termal := Calculo_taxa_Termal_aux;
{writeln('Calculo_taxa_Termal ',Calculo_taxa_Termal:0:4);}

{Calculo_taxa_fotoperiodo representa valor de 0 a 1 em função do comprimento da noite
comp_Noite comprimento da noite em horas em função da latitude e longitude e dia do ano}
{nota3: o comprimento da noite min (8.7) e otimas (11.25) foram retiradas do trabalho de Grimm e
Boote 1994 Agronomy Journal em funcao da variedade de soja BRAAG que estou trabalhando}

if (comp_Noite <= 9.04) then Calculo_taxa_fotoperiodo_aux := 0;

if (comp_Noite >= 12.58) then Calculo_taxa_fotoperiodo_aux := 1;

if (( 9.04 < comp_Noite )and ( comp_Noite < 12.58 )) then
Calculo_taxa_fotoperiodo_aux := (comp_Noite - 9.04)/(12.58 - 9.04);

Calculo_taxa_fotoperiodo := Calculo_taxa_fotoperiodo_aux ;

{writeln('Calculo_taxa_fotoperiodo ',Calculo_taxa_fotoperiodo:0:4);}

Valor_dia_foto_Termal_R1_R5 := Calculo_taxa_Termal * Calculo_taxa_fotoperiodo;
{writeln('R1 IN. DA FLORACAO => R5 IN. DO ENCHIMENTO DE GRAOS => R7 MAT. FISIOLÓGICA');}
end;

function Valor_dia_foto_Termal_R5_R7(temp_media,comp_noite:real):real;
{necessita de 31.30 unidades termiais acumuladas}
Var

    valor_Termal_R5_R7,Calculo_taxa_Termal_aux,Calculo_taxa_fotoperiodo_aux :real;
Begin
valor_Termal_r5_r7 := 0;
{nota: Tmedia representa a temperatura para calculo }
{nota2: as temperaturas min (2.44) e otimas (26.73) foram retiradas do trabalho de Grimm e
Boote 1994 Agronomy Journal em funcao da variedade de soja BRAAG que estou trabalhando}

if (Temp_media <= 2.44) then Calculo_taxa_Termal_aux := 0;

if (Temp_media >= 25.89) then Calculo_taxa_Termal_aux := 1;

if (( 2.44 < Temp_media )and ( Temp_media < 25.89 )) then
Calculo_taxa_Termal_aux := (Temp_media - 2.44)/(25.89 - 2.44);

```

```
Calculo_taxa_Termal := Calculo_taxa_Termal_aux;
```

```
{Calculo_taxa_fotoperiodo representa valor de 0 a 1 em função do comprimento da noite
comp_Noite comprimento da noite em horas em função da latitude e longitude e dia do ano}
{nota3: o comprimento da noite min (8.7) e otimas (11.25) foram retiradas do trabalho de Grimm e
Boote 1994 Agronomy Journal em funcao da variedade de soja BRAAG que estou trabalhando}
```

```
if (comp_Noite <= 9.43) then Calculo_taxa_fotoperiodo_aux := 0;
```

```
if (comp_Noite >= 12.80) then Calculo_taxa_fotoperiodo_aux := 1;
```

```
if (( 9.43 < comp_Noite )and ( comp_Noite < 12.80 )) then
Calculo_taxa_fotoperiodo_aux := (comp_Noite - 9.43)/(12.80 - 9.43);
```

```
Calculo_taxa_fotoperiodo := Calculo_taxa_fotoperiodo_aux ;
```

```
Valor_dia_foto_Termal_R5_R7 := Calculo_taxa_Termal * Calculo_taxa_fotoperiodo;
```

```
end;
```

```
Procedure Leio_Arquivos_ambientes(var total_valor_dia_foto_Termal, fotos_bruta:real;
chrom:chromosome;lchrom:integer,VAR TOTAL_FOTO_LIQUIDA,TOTAL_PSF:REAL);
```

```
var srad,temp_maxima,temp_minima :real;
Arq, arq2,saida :Text;
i,j,d,fico,pulo,CONTADOR,MAXIMO :integer;
r,rain,date,par,comp_noite :real;
s :string;
dayd,sw1d,sw2d,sw3d,sw4d,sw5d,sw6d,sw7d,sw8d,sw9d,sw10d:real;
```

```
begin {1}
```

```
date := 0;
```

```
srad := 0;
```

```
temp_maxima:= 0;
```

```
temp_minima := 0;
```

```
rain := 0;
```

```
temp_media := 0;
```

```
par := 0;
```

```
total_valor_dia_foto_Termal:=0;
```

```
dayd:=0;
```

```
sw1d:=0; sw2d:=0; sw3d:=0; sw4d:=0; sw5d:=0;
```

```
sw6d:=0; sw7d:=0; sw8d:=0; sw9d:=0; sw10d:=0;
```

```
h2o_dispo:= 0;dayd:= 0;comp_noite :=0;
```

```
{arquivos de condições do ambiente}
```

```
assign(Arq2,'water_i2.out');{water_i2.out, waterstr.out ou water_ni}
```

```
assign(Arq,'figa7901.wth');
```

```
reset (Arq);reset (Arq2);
```

```
readln(arq);readln(arq);
```

```
readln(arq);readln(arq);
```

```
readln(arq2);readln(arq2);readln(arq2);readln(arq2);readln(arq2);
```

```
readln(arq,s);
```

```
{writeln(s);
```

```
readln;}
```

```
assign(saida,'cropsim.out');
```

```
rewrite(saida);
```

```
contador_bom :=0;
```

```
writeln (saida,'Dia LAI PSf Psc Psr PSt PSfruto');
```

```
while ((not (eof (Arq))) and (not (eof(Arq2))) and (dia < lchrom)) do
```

```
begin {2}
```

```
dia:=dia+1;
```

```
CONTADOR :=1 ;
```

```
MAXIMO := 120 DIV LCHROM;
```

```

WHILE (CONTADOR <= MAXIMO) DO
BEGIN { DO CONTADOR}
  i:=1;
  while (i<=6) do
  begin{3}
    read (arq,r);

    if i = 1 then date := r;
    if i = 2 then srاد:=r;
    if i = 3 then temp_maxima:=r;
    if i = 4 then temp_minima := r;
    if i = 5 then rain := r;
    if i = 6 then par := r;
    temp_media := (temp_maxima + temp_minima)/2;
    i:=i+1;
  end;{3}
  j:=1;
  while (j<=39) do

  begin{5}

    read(arq2,r);

    if j = 14 then dayd := r;
    if j = 20 then sw1d := r;
    if j = 21 then sw2d := r;
    if j = 22 then sw3d := r;
    if j = 23 then sw4d := r;
    if j = 24 then sw5d := r;
    if j = 25 then sw6d := r;
    if j = 26 then sw7d := r;
    if j = 27 then sw8d := r;
    if j = 28 then sw9d := r;
    if j = 29 then sw10d := r;

    j:=j+1;
    h2o_dispo := (sw1d+sw2d+sw3d+sw4d+sw5d+sw6d+sw7d+sw8d+sw9d)/9;
    comp_noite := 24-dayd;

  end;{5}

  valor_termal_R1:= Valor_dia_foto_Termal_R1(temp_media,comp_noite);
  if (total_valor_dia_foto_Termal < 22) Then
  total_valor_dia_foto_Termal := valor_Termal_r1 + total_valor_dia_foto_Termal;

  if ((total_valor_dia_foto_Termal >= 22)and (total_valor_dia_foto_Termal <= 68.00))
  then      {22          37}
  begin
  valor_Termal_R1_R5 := Valor_dia_foto_Termal_R1_R5(temp_media,comp_noite);
  total_valor_dia_foto_Termal:=
  total_valor_dia_foto_Termal + valor_Termal_R1_R5;
  end;

  if ((total_valor_dia_foto_Termal > 68.00) and
  (total_valor_dia_foto_Termal <= 130.13))
  {valor original >37.01 <= 68.131}
  Then Begin
  valor_Termal_R5_R7 := valor_dia_foto_Termal_R5_R7(temp_media,comp_noite);
  total_valor_dia_foto_Termal:=
  total_valor_dia_foto_Termal + valor_Termal_R5_R7;
  End;

  fotos_bruta:= fotossintese(srاد,temp_media,h2o_dispo);

  fotos_liquida_ch20 := fotos_bruta* 0.295; {fator p/ ajuste}

  fotos_liquida := fotos_liquida_ch20/6;{/6 transformando carbohidrato
  em glucose}

  {writeln('fotos. Liqui =', fotos_liquida:0:3,' g gluc. C6H12O6/m2/dia '); }

```

```

{writeln('agua ', func_h2o(h2o_dispo):0:2);}

CONTADOR := CONTADOR + 1;
Parto_Mecanico(fotos_liquida,total_valor_dia_foto_Termal,pool1,pool2,pool3,h2o_dispo,
  chrom,lchrom,dia,vec_raiz[dia]);

END; { CONTADOR }

TOTAL_FOTO_LIQUIDA := TOTAL_FOTO_LIQUIDA + FOTOS_LIQUIDA;

area_rad := ps_raiz * 1.75; {cm2} {estimado segundo Brouwer 1g raiz/1,75 cm2}
area_foliar := ps_folhas_pl * 0.0175 {1764 estava usando 0.0175}; {cm2}
{area foliar pode ser calculada por metro quadrado ficando
semelhante ao LAI}
{Boote => 1cm2 de folha = 0,003 g de folha ou 1 g folha = 332 cm2 de folha}

peso_seco_total := ps_folhas_pl + ps_raiz + ps_caule + ps_fruto;

num_plantas_m2 := ((10000 / esp_plantas) * (10000 / esp_linha)) / 10000;
LAI := (num_plantas_m2 * ps_folhas_pl) / slw; {m2 / m2}

{ para obter peso seco em Kg/Ha}

PSt := (peso_seco_total * num_plantas_m2 * 10000) / 1000;
PSf := (ps_folhas_pl * num_plantas_m2 * 10000) / 1000;
PSc := (ps_caule * num_plantas_m2 * 10000) / 1000;
PSr := (ps_raiz * num_plantas_m2 * 10000) / 1000;
PSfr := (ps_fruto * num_plantas_m2 * 10000) / 1000;

{ if ((vec_relacao[dia]+0.05) > (PSr/(PSf+PSc))) Then
  if ((vec_relacao[dia]-0.05) < (PSr/(PSf+PSc))) Then
    contador_bom := contador_bom + 1; }

if ((4.0) > (PSr/(PSf+PSc))) Then
  if ((0.1) < (PSr/(PSf+PSc))) Then
    contador_bom := contador_bom + 1;

{ writeln;
writeln (' LAI PSf Psc PSr PSt PS frut');
writeln (LAI:0:2,' ',psf:0:2,' ',psc:0:2,' ',psr:0:2,' ',pst:0:2,' ',psfr:0:2);
}
{ readln; }
makereport(saida,date,LAI,area_foliar,num_plantas_m2,
  peso_seco_total,ps_folhas_pl,ps_raiz,ps_caule,ps_fruto);
{ writeln(saida,contador_bom);}

end; {2}
close(saida);
close(arq2);
close(arq);
end; {1}

FUNCTION Principal(chrom:chromosome;lchrom:integer):REAL;
VAR
  TOTAL_FOTO_LIQUIDA:REAL;
  TOTAL_PSfr :real;

BEGIN {principal}
TOTAL_PSfr := 0;
TOTAL_FOTO_LIQUIDA := 0;
{inicialização das variáveis NOTA: plantas após emergencia estagio Vo\}

dia := 0 {5}; {início do quinto 5 dia pois anterior a isto os dados são muito pequenos
não havendo condições de boas medições}

```

```

slw := 47 {esta em 65}; {g folha ps / 1 m2} { o Specif Leaf Weigth
pode variar entre 47 e 86 g/m2 - media 62
segundo Nelson 1988 - Nota: comecei com 58}
ps_fruto:= 0;
ps_raiz := 0.0489; {g}
ps_folhas_pl := 0.0362; {g}
ps_caule := 0.0085; {g}
peso_seco_total := ps_raiz + ps_folhas_pl + ps_caule + ps_fruto;
area_rad := ps_raiz * 1.765; {cm2} {estimado segundo Brouwer 1g raiz/1,75 cm2}
area_foliar := ps_folhas_pl * 0.0175; {m2} {Boote => 1cm2 de folha = 0,003 g de folha ou
1 g folha = 332 cm2 de folha no entanto para se ajustar
o modelo inicial utilizou-se 0.01767 promovendo uma
inicialização igual ao modelo IBISNET}

num_plantas_m2 := ((10000 / esp_plantas)* (10000 / esp_linha)/ 10000;

LAI := (num_plantas_m2 * ps_folhas_pl)/slw; {m2 foliar / m2 de solo}
{writeln('num_plantas_m2 - ',num_plantas_m2:0:2, ' LAI = ',lai:0:2 );}

{writeln(' LAI A.fol/pl pl./m2 PS(g) PS folhas Ps raiz Ps caule Ps fruto');
writeln(LAI:0:3,'area_foliar:0:3,' num_plantas_m2:0:2,' ',
peso_seco_total:0:2,' ',ps_folhas_pl:0:5,' ',ps_raiz:0:5,' ',ps_caule:0:5,' ',ps_fruto:0:5);
writeln; }
Leio_Arquivos_ambientes(total_valor_dia_foto_Termal,fotos_bruta,chrom,lchrom,TOTAL_FOTO_LIQUIDA,TOTAL_PSFr);
{este procedimento le os arq. ambientes e executa o procedimento fotossintese dentro dele}
{fotossintese;}

contador_bom := 11-contador_bom;
PRINCIPAL := PSfr/contador_bom;
{PRINCIPAL := PSfr;}
{writeln('PSfr ', psfr:0:2); readln;}

end;

END.
unit global;

interface

const
MAXPOP = 100;
tamanho = 120;
type
allele = {Longint;} INTEGER;
chromosome = array[1..tamanho*3] of allele; {vetor 3x10 COMPOSTA DE
PARTICIONAMENTO RELATIVO - % - }
individual = record
chrom : chromosome; { GENOTIPO }
fitness : real; { variavel representada e adequaCAO }
parent1, PARENT2, XSITE: INTEGER; { informaCAO DOS PAIS E PONTO DO CROSSOVER }
end;

population = File of individual;

implementation

end.

```

UNIT TIPOS;

{ guarda as variaveis globais do programa }

Interface

uses wincrt;

type

vec\_raiz\_T = array[1..10] of integer;

vec\_raiz\_R = array[1..10] of real;

var

peso\_seco\_total, ps\_raiz, ps\_folhas\_pl :real;  
 PSt, PSf, PSc, PSr, PSfr, pool1, pool2, pool3 :real;  
 num\_plantas\_m2, fotos\_bruta :real;  
 fotos\_liquida, fotos\_liquida\_ch20, ps\_caule :real;  
 fotos\_liquida\_sen, day\_before :real;  
 area\_rad, area\_foliar, ps\_fruto :real; {variaveis utilizadas para fitness}  
 srad, h2o\_dispo, temp\_media, lai :real; {var utilizadas nas funções}  
 dia\_date, slw :integer;  
 saida :text;  
 dayd, total\_valor\_dia\_foto\_Termal, teste :real;  
 Calculo\_taxa\_Termal, Calculo\_taxa\_fotoperiodo :real;  
 s :string;  
 comp\_noite,  
 {Res\_man\_sen, Res\_cresc\_sen :real;}  
 valor\_Termal\_R1 :real;  
 valor\_Termal\_R1\_R5 :real;  
 valor\_thermal\_R5\_R7 :real;  
 vec\_raiz: vec\_raiz\_T;  
 vec\_relacao: vec\_raiz\_R;

{variaves utilizadas para senescencia no Partmec...}

senesc\_ini\_f, senesc\_ini\_r :real;  
 senesc\_pre\_enchi\_f, senesc\_pre\_enchi\_r,  
 senesc\_pre\_enchi\_c :real;  
 senesc\_pos\_enchi\_f, senesc\_pos\_enchi\_c,  
 senesc\_pos\_enchi\_r :real;  
 senesc\_rapida\_f, senesc\_rapida\_c, senesc\_rapida\_r :real;

reservas\_c, reservas\_f :real;  
 resp\_f, resp\_c, resp\_r, resp\_fr : real;  
 custo\_c: real;

implementation

end.

Unit Partmec5;

Interface

Uses wincrt,tipos,global;  
{procedimento para o particionamento com algoritmo genetico }

Procedure Parto\_mecanico  
( var  
fotos\_liquida , total\_valor\_dia\_foto\_Termal, pool1, pool2,pool3  
,h2o\_dispo:real;  
chrom:chromosome;  
lchrom:integer;  
dia:integer;  
raiz: integer);

Implementation

Procedure Parto\_mecanico(  
var  
fotos\_liquida , total\_valor\_dia\_foto\_Termal, pool1, pool2,pool3  
,h2o\_dispo:real;  
chrom:chromosome;  
lchrom:integer;  
dia:integer;  
raiz: integer);  
{ Nota: entre chaves encontram-se o custo da sintese do tecido  
em g glu/ g de tecido, o valor colocado na equacao é conhecido como  
eficiencia de convercao}

const  
resp\_f = 0.027;  
resp\_c = 0.015;  
resp\_r = 0.013;  
resp\_fr = 0.01;  
{fatores de respiração estão mais ou menos de acordo com trabalho  
Holandeses}

custo\_c = 0.71; {0.56 custo de conversão}

Begin

senesc\_ini\_f := 0.009 ;  
senesc\_ini\_r := 0.008 ;

senesc\_pre\_enchi\_f := 0.03 ;  
senesc\_pre\_enchi\_r := 0.01 ;  
senesc\_pre\_enchi\_c := 0.02 ;

senesc\_pos\_enchi\_f := 0.002 ;  
senesc\_pos\_enchi\_c := 0.003 ;  
senesc\_pos\_enchi\_r := 0.005 ;

senesc\_rapida\_f := 0.12 ;  
senesc\_rapida\_c := 0 ;  
senesc\_rapida\_r := 0.009 ;

If (h2o\_dispo > 0.057) and (h2o\_dispo <= 0.065) then

begin

senesc\_ini\_f := 0.012 ;  
senesc\_ini\_r := 0.009 ;

senesc\_pre\_enchi\_f := 0.037 ;  
senesc\_pre\_enchi\_r := 0.012 ;  
senesc\_pre\_enchi\_c := 0.025 ;

senesc\_pos\_enchi\_f := 0.035 ;  
senesc\_pos\_enchi\_c := 0.022 ;  
senesc\_pos\_enchi\_r := 0.012 ;

senesc\_rapida\_f := 0.15 ;

```

senesc_rapida_c := 0.0002;
senesc_rapida_r := 0.006;

end;

If (h2o_dispo <= 0.057) and (h2o_dispo > 0.00) then

begin

senesc_ini_f := 0.009 ;
senesc_ini_r := 0.0090 ;

senesc_pre_enchi_f := 0.032 ;
senesc_pre_enchi_r := 0.012 ;
senesc_pre_enchi_c := 0.025 ;

senesc_pos_enchi_f := 0.010 ;
senesc_pos_enchi_c := 0.005 ;
senesc_pos_enchi_r := 0.014 ;

senesc_rapida_f := 0.12 ;
senesc_rapida_c := 0.02 ;
senesc_rapida_r := - 0.02;

end;

pool1 := fotos_liquida * 0.15;

If ((total_valor_dia_foto_Termal > 0) and
(total_valor_dia_foto_Termal <=18)) {71}

Then Begin
ps_folhas_pl :=
ps_folhas_pl + (chrom[dia]/100 * (pool1+pool2) * 0.66) {0.59}
- (resp_f*ps_folhas_pl); {g}

ps_caule :=
ps_caule+(chrom[lchrom+dia]/100*(pool1+pool2)*custo_c)
- (resp_c * ps_caule);

ps_raiz :=
ps_raiz +(raiz/100 * (pool1+pool2) * 0.88) {0.65}
- ( resp_r* ps_raiz);

ps_fruto :=
ps_fruto+chrom[lchrom*2+dia]/100*((pool1+pool2)*0.28)
- (resp_fr * ps_fruto) ; {g}

End;

If ((total_valor_dia_foto_Termal > 18) and
(total_valor_dia_foto_Termal <32)) {71}

Then Begin
ps_folhas_pl :=
ps_folhas_pl + ( chrom[dia]/100 * (pool1+pool2) * 0.66) {0.59}
- (ps_folhas_pl * senesc_ini_f)-(resp_f*ps_folhas_pl);

ps_caule :=
ps_caule + ( chrom[lchrom+dia]/100 * (pool1+pool2) * custo_c)
- (resp_c * ps_caule); {g}

ps_raiz :=
ps_raiz +( raiz/100 * (pool1+pool2) * 0.88) {0.65}
- (ps_raiz * senesc_ini_r)-( resp_r* ps_raiz);

ps_fruto :=
(ps_fruto + chrom[lchrom*2+dia]/100 *(pool1+pool2)* 0.28)
- (resp_fr * ps_fruto) ;

End;

If ((total_valor_dia_foto_Termal > 32) and

```

```

(total_valor_dia_foto_Termal <=40))

Then Begin
{
  writeIn('32 < dia foto Termal <= 40 ',total_valor_dia_foto_Termal:0:4);
  readln;
  ps_folhas_pl :=
  ps_folhas_pl +(chrom[dia]/100 * (pool1+pool2) * 0.66) {0.59}
  -(ps_folhas_pl * senesc_pre_enchi_f)-(resp_f*ps_folhas_pl);

  ps_caule :=
  ps_caule + chrom[lchrom+dia]/100 * ((pool1+pool2) * custo_c)
  -(ps_caule * senesc_pre_enchi_c)-(resp_c * ps_caule);

  ps_raiz :=
  ps_raiz + (raiz/100 * (pool1+pool2) * 0.88) {0.65}
  -(ps_raiz * senesc_pre_enchi_r)-(resp_r*ps_raiz);

  ps_fruto :=
  (ps_fruto + chrom[lchrom*2+dia]/100*(pool1+pool2) * 0.28)
  -(resp_fr * ps_fruto);

End;

If ((total_valor_dia_foto_Termal > 40) and
(total_valor_dia_foto_Termal <=68))
{de R5 ate R7 + 31.30 Un. Ter.} {valor original >37.01 <= 68.131}

Then Begin

ps_folhas_pl :=
ps_folhas_pl + ( chrom[dia]/100 * (pool1+pool2) * 0.66) {0.59}
-(ps_folhas_pl * senesc_pos_enchi_f)-(ps_folhas_pl * 0.004)-(0.01*ps_folhas_pl); {g}

ps_caule :=
ps_caule +(chrom[lchrom+dia]/100 * (pool1+pool2) * custo_c)
-(ps_caule * senesc_pos_enchi_c)-(ps_caule * 0.0009)-(resp_c * ps_caule); {g}

ps_raiz :=
ps_raiz +(raiz/100*(pool1+pool2)* 0.88) {0.65}
-(ps_raiz * senesc_pos_enchi_r)-( resp_r*ps_raiz); {g}

ps_fruto :=
ps_fruto + ( chrom[lchrom*2+dia]/100 * (pool1+pool2)* 0.28)
+(ps_folhas_pl * 0.0038) + (ps_caule * 0.0005))
-(resp_fr * ps_fruto); {existe uma perda na mobilizacao dessas reservas}
End;

If ((total_valor_dia_foto_Termal > 68) and
(total_valor_dia_foto_Termal <=170))
{de R5 ate R7 + 31.30 Un. Ter.} {valor original >37.01 <= 68.131}

Then Begin {para efeito de senescencia final}

ps_folhas_pl :=
ps_folhas_pl +(chrom[dia]/100 * (pool1+pool2) * 0.66) {0.59}
-(ps_folhas_pl * senesc_rapida_f)-(0.01*ps_folhas_pl); {g}

ps_caule :=
ps_caule + (chrom[lchrom+dia]/100 * (pool1+pool2)* custo_c)
-(ps_caule * senesc_rapida_c)-(resp_c * ps_caule); {g}

ps_raiz :=
ps_raiz +(raiz/100 * (pool1+pool2)* 0.88) {0.65}
-((ps_raiz) * senesc_rapida_r)-( resp_r*ps_raiz);

ps_fruto :=
ps_fruto +( chrom[lchrom*2+dia]/100 * (pool1+pool2)*0.28)
-(resp_fr * ps_fruto); {g}
End;
pool2 := fotos_liquida * 0.85;
end;
End.

```

UNIT Report;

interface  
uses tipos;

procedure makereport  
(var saida:text;  
date,LAI,area\_foliar,num\_plantas\_m2,  
peso\_seco\_total,ps\_folhas,ps\_raiz,ps\_caule,ps\_fruto: real);

Implementation  
procedure makereport;

begin  
writeln (saida,date:0:0, 'LAI:5:2,' 'psf:8:1,' '  
psc:8:1,' 'psr:8:1,' 'pst:0:1,' 'psfr:7:1');

end;  
End.