

**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Calibração e avaliação do modelo ORYZA-APSIM para o arroz de terras
altas no Brasil**

Rogério Lorençoni

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Fitotecnia

Piracicaba
2009

Livros Grátis

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

Milhares de livros grátis para download.

Rogério Lorençoni
Engenheiro Agrônomo

Calibração e avaliação do modelo ORYZA-APSIM para o arroz de terras altas no Brasil

Orientador:
Prof. Dr. **DURVAL DOURADO NETO**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em
Ciências. Área de concentração: Fitotecnia

Piracicaba
2009

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP**

Lorençoni, Rogério

Calibração e avaliação do modelo ORYZA-APSIM para o arroz de terras altas no Brasil /
Rogério Lorençoni. - - Piracicaba, 2009.
81 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2009.
Bibliografia.

1. Arroz 2. Modelagem de dados 3. Variedades vegetais I. Título

CDD 633.18
L869c

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

Ao meu pai, Valter Lorençoni, pelo seu caráter e ensinamentos passados durante a minha formação,

À minha mãe, Isabel Cristina Damázio, pela garra, determinação, carinho, dedicação e amor com que criou e educou seus filhos, e pelo esforço feito para que eu pudesse alcançar mais este objetivo,

Ao meu irmão Rodrigo Lorençoni, pela ajuda prestada em todas etapas de minha vida, e

A todos meus familiares e amigos, que torceram e contribuíram para o meu sucesso,

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço:

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo (Departamento de Produção Vegetal e Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia) pela oportunidade de realizar o Mestrado;

Ao meu orientador, Dr. Durval Dourado Neto, por sempre acreditar e estimular o potencial de seus orientados;

Ao pesquisador da Embrapa *Arroz e Feijão*, Dr. Alexandre Bryan Heinemann, pelo auxílio e dedicação prestada, sendo fundamental no desenvolvimento deste trabalho;

Aos professores da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, que dedicam suas vidas à nobre arte de ensinar e também aprender com seus alunos, primando pelo ensino de qualidade e contribuindo na formação de profissionais e cidadãos responsáveis;

Aos meus amigos de pós-graduação, Adilson Nunes da Silva, Leonardo Cirilo da Silva Soares, Cecílio Frois Caldeira Junior, Francynês da Conceição Oliveira Macedo e muitos outros, que fazem dessa Escola uma grande família;

À EMBRAPA *Arroz e Feijão*, seus pesquisadores e funcionários que contribuíram indiretamente na realização deste trabalho;

Ao Professor Ricardo Ferraz de Oliveira, por me receber como um filho em seu laboratório, pela sabedoria, dedicação e carinho com que trata e estimula a busca do conhecimento de seus alunos;

À secretária do Programa de Pós-graduação em Fitotecnia Luciane Aparecida Lopes Toledo, carinhosamente chamada de “Lu”, pelo carinho e dedicação com que trata dos assuntos dos alunos do programa;

À minha orientadora de graduação, Dr. Susana Cristine Siebeneichler, pela amizade e ensinamentos passados durante minha graduação;

À todos os funcionários que fazem desta Escola uma instituição de excelência, pela dedicação com que tratam do bem estar de seus alunos; e

À CAPES, pela disponibilização da Bolsa de Estudos.

SUMÁRIO

RESUMO	9
ABSTRACT	11
LISTA DE FIGURAS	13
LISTA DE TABELAS	17
1 INTRODUÇÃO	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1 Importância econômica e social da cultura do arroz	23
2.2 Restrições ao cultivo do arroz irrigado no Rio Grande do Sul	25
2.3 O arroz de terras altas	27
2.4 A variedade cultivada de arroz de terras altas BRS-Primavera	29
2.5 Os modelos matemáticos de crescimento, desenvolvimento e produção	32
2.6 O modelo ORYZA-APSIM	34
3 MATERIAL E MÉTODOS	37
3.1 Crescimento e desenvolvimento do arroz no modelo ORYZA-APSIM	37
3.2 Dinâmica da água e o balanço hídrico no modelo ORYZA-APSIM	40
3.3 Dinâmica do nitrogênio no modelo ORYZA-APSIM	41
3.4 Esquema seqüencial de cálculos do modelo ORYZA-APSIM	42
3.5 Variáveis de entrada do modelo ORYZA-APSIM	42
3.6 Dados experimentais	43
3.7 Calibração do modelo ORYZA-APSIM	45
3.7.1 Calibração do desenvolvimento fenológico da variedade cultivada de arroz de terras altas BRS-Primavera no modelo ORYZA-APSIM	45
3.7.2 Calibração do crescimento da variedade cultivada de arroz de terras altas BRS-Primavera no modelo ORYZA-APSIM	48
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
4.1 Determinação da sensibilidade fotoperiódica da variedade cultivada de terras altas BRS-Primavera	55
4.2 Avaliação do desenvolvimento fenológico da variedade cultivada de arroz de terras altas BRS-Primavera no modelo ORYZA-APSIM	56

4.3	Avaliação do crescimento da variedade cultivada de arroz de terras altas BRS-Primavera no modelo ORYZA-APSIM.....	65
4.3.1	Avaliação do crescimento da variedade cultivada de arroz de terras altas BRS-Primavera para as condições da calibração.....	66
4.3.2	Avaliação da produtividade da variedade cultivada de arroz de terras altas BRS-Primavera para as condições de quatro regiões produtoras de arroz	70
4.4	Considerações finais.....	72
5	CONCLUSÕES	75
	REFERÊNCIAS.....	77

RESUMO

Calibração e avaliação do modelo ORYZA-APSIM para o arroz de terras altas no Brasil

Com o objetivo de calibrar e avaliar o modelo ORYZA-APSIM para o arroz de terras altas no Brasil, foram conduzidos dezessete experimentos pela *EMBRAPA Arroz e Feijão*, em quatro regiões brasileiras (Santo Antônio de Goiás-GO, Sorriso-MT, Gurupi-TO e Teresina-PI) produtoras de arroz de terras altas, entre as safras de 2005/2006 e 2008/2009. O modelo foi calibrado e avaliado para a variedade cultivada de arroz de terras altas BRS-Primavera. Os dados da calibração foram obtidos de dois experimentos realizados na área experimental da *EMBRAPA Arroz e Feijão*, localizada no município de Santo Antônio de Goiás-GO, conduzidos em duas datas de semeadura durante a safra 2008/2009. As seguintes variáveis foram definidas na calibração: (i) unidades de calor efetivo diário, (ii) taxas de desenvolvimento fenológico para cada estágio, (iii) frações de massa de matéria seca das folhas, colmos, órgãos de armazenagem e colmos de reserva durante diferentes fases de desenvolvimento da cultura, (iv) taxa de crescimento inicial da área foliar e (v) parâmetros utilizados para determinar a área foliar específica. Na avaliação do modelo, foram comparados valores simulados com valores observados da massa de matéria seca total da parte aérea (*MST*) e de folhas verdes (*MSF*), índice de área foliar (*IAF*), produtividade e duração (número de dias) do período entre a emergência e o florescimento da cultura de arroz de terras altas. O modelo não apresentou desempenho satisfatório na simulação da duração das diferentes fases fenológicas de desenvolvimento para a região de Teresina-PI (os números de dias simulados foram, em média, oito dias superiores aos valores observados). O *IAF*, a *MST* e a *MSF* foram avaliados para as condições dos dois experimentos utilizados na calibração. As simulações do *IAF* diferiram dos valores observados nos dois experimentos, nos quais os valores finais da *MST* simulada foram semelhantes aos observados, mas diferiram dos observados durante a fase entre o florescimento e o ponto de maturidade fisiológica. A *MSF* simulada apresentou bom desempenho no primeiro experimento, mas regular no segundo experimento. No segundo experimento de campo, as variações da *MSF*, *MST* e o *IAF* foram causadas por um período de estresse hídrico simulado no modelo. O efeito do estresse hídrico foi superestimado no modelo. Comparando os valores simulados e observados de produtividade, por intermédio de uma regressão linear, verificou-se que o modelo (ORYZA-APSIM) pode determinar a ordem de grandeza da produtividade do arroz de terras altas ao nível de significância de 10%.

Palavras-chave: *Oryza sativa*, BRS-Primavera; Modelagem

ABSTRACT

Calibration and evaluation of the ORYZA-APSIM model for the upland rice in Brazil

With the purpose of calibrating and evaluating the ORYZA-APSIM model for the upland rice in Brazil, seventeen field experiments were carried out at *EMBRAPA Arroz e Feijão*, in four upland rice Brazilian regions (Santo Antônio de Goiás-GO, Sorriso-MT, Gurupi and Teresina-PI), from 2005/2006 to 2008/2009 seasons. The model was calibrated and evaluated for an upland rice, cultivar BRS-Primavera. The calibration data were obtained from two field experiments carried out at the experimental area of *EMBRAPA Arroz e Feijão*, located at Santo Antônio de Goiás-GO, performed at two sowing dates during the 2008/2009 season. The following variables were defined in the calibration: (i) the effective heat daily units, (ii) phenological development rates at each crop stage, (iii) fractions of the dry matter of leaves, stems, storage organs and stems of reserves during the developmental crop stages, (iv) initial growth rate of leaf area and (v) parameters used to define the specific leaf area. In the model evaluation, simulated values were compared with observed values of total dry matter of shoot (*DMS*), dry matter of green leaves (*DMGL*), leaf area index (*LAI*), yield and duration (number of days) of the period from emergence to flowering of upland rice crop. The model did not present satisfactory performance to simulate the duration of different phenological phases of development for the Teresina-PI region (the numbers of simulated days were, in average, eight days greater than the observed values). The *LAI*, *DMS* and *DMGL* values were evaluated for the conditions of the two experiments used for calibration. The *LAI* simulations differed from the values observed in both experiments, where the final *DMS* simulated values were similar to those observed, but differed during the phase between flowering and physiological maturity point. The simulated *DMGL* showed a better performance in the first experiment, but regular in the second experiment. In the second field experiment, the *DMS*, *DMGL* and *LAI* variations were due to a period of drought stress simulated in the model. The model greatly penalized the growth of the culture under conditions of drought stress. The water stress effect was overestimated in the model. Comparing the simulated and observed values of yield, using a linear regression, it was verified that the model (ORYZA-APSIM) can define the magnitude order of upland rice productivity at 10% of significance level.

Keywords: ORYZA-APSIM; *Oryza sativa*, BRS-Primavera; Modeling

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Diagrama relacional do modelo ORYZA-APSIM para produção limitada por água e nitrogênio. As caixas são variáveis de estado, válvulas são taxas variáveis e círculos são variáveis intermediárias. As linhas sólidas são fluxos de material e as linhas tracejadas são fluxos de informações35
- Figura 2 - Representação esquemática do desenvolvimento fenológico da cultura de arroz (*DVS*) nas diferentes fases: (fase 1) emergência à iniciação da panícula, (fase 2) iniciação da panícula ao florescimento e (fase 3) florescimento ao ponto de maturidade fisiológica 39
- Figura 3 - Dados climáticos observados durante ciclo da cultura de arroz de terras altas na safra 2008/200945
- Figura 4 - Valores observados da partição de assimilados para as folhas (*FLV*, kg.kg^{-1}) em diferentes estádios de desenvolvimento da variedade cultivada de terras altas BRS-Primavera49
- Figura 5 - Valores observados da partição de assimilados para colmos (*FST*, kg.kg^{-1}) em diferentes estádios de desenvolvimento da variedade cultivada de terras altas BRS-Primavera50
- Figura 6 - Valores observados da partição de assimilados para os órgãos de armazenagem (*FSO*, kg.kg^{-1}) em diferentes estádios de desenvolvimento da variedade cultivada de terras altas BRS-Primavera50
- Figura 7 - Curvas de partição de assimilados para as folhas (*FLV*, kg.kg^{-1}) da variedade cultivada irrigada IR-72 e de terras altas BRS-Primavera51
- Figura 8 - Curvas de partição de assimilados para os colmos (*FST*, kg.kg^{-1}) da variedade cultivada irrigada IR-72 e da variedade cultivada de terras altas BRS-Primavera51
- Figura 9 - Curvas de partição de assimilados para os órgãos de armazenagem (*FSO*, kg.kg^{-1}) da variedade cultivada irrigada IR-72 e da variedade cultivada de terras altas BRS-Primavera52
- Figura 10 - Curva da área foliar específica (*AFE*, ha.kg^{-1} - ha de folha por kg de folha) ajustada pelos parâmetros A e B em função dos valores observados53

- Figura 11 - Regressão linear para a caracterização da sensibilidade fotoperiódica da variedade cultivada de arroz de terras altas BRS-Primavera ($DEF=0,0115.j + 72,136$; $R^2 = 0,1691$ - DEF: dias entre emergência e florescimento e j: número de ordem do dia do ano)..... 55
- Figura 12 - Avaliação da duração das fases 1 e 2 (emergência ao florescimento). Comparação entre os números de dias simulados e observados entre a emergência e o florescimento (DEF, dia) da variedade cultivada de terras altas BRS-Primavera em Teresina-PI, Gurupi-TO, Sorriso-MT e Santo Antônio de Goiás-GO..... 57
- Figura 13 - Unidades de calor efetivo diário (HU , $^{\circ}C.dia.dia^{-1}$) em função da temperatura média (T_{md} , $^{\circ}C$) com temperatura máxima de $42^{\circ}C$ (T_M , $^{\circ}C$) (T_b : temperatura basal - $8^{\circ}C$, T_O : temperatura ótima - $30^{\circ}C$) (valores adotados no modelo ORYZA-APSIM)..... 57
- Figura 14 - Unidades de calor efetivo diário (HU , $^{\circ}C.dia.dia^{-1}$) em função da temperatura média (T_{md} , $^{\circ}C$) com elevação da temperatura máxima para $50^{\circ}C$ (T_M , $^{\circ}C$) (T_b : temperatura basal - $8^{\circ}C$, T_O : temperatura ótima - $30^{\circ}C$)..... 59
- Figura 15 - Influência da elevação da temperatura máxima (T_M , $^{\circ}C$) de $42^{\circ}C$ nas unidades de calor efetivo diário (HU_{42} , $^{\circ}C.dia.dia^{-1}$) das fases 1 e 2 (emergência ao florescimento) para Santo Antônio de Goiás-GO em relação às unidades de calor efetivo diário (HU_{50} , $^{\circ}C.dia.dia^{-1}$) para a temperatura máxima (T_M , $^{\circ}C$) de $50^{\circ}C$ ($HU_{50} = 1,0393.HU_{42} + 0,5411$; $R^2 = 0,9826$)..... 60
- Figura 16 - Influência da elevação da temperatura máxima (T_M , $^{\circ}C$) de $42^{\circ}C$ nas unidades de calor efetivo diário (HU_{42} , $^{\circ}C.dia.dia^{-1}$) das fases 1 e 2 (emergência ao florescimento) para Teresina-PI em relação às unidades de calor efetivo diário (HU_{50} , $^{\circ}C.dia.dia^{-1}$) para a temperatura máxima (T_M , $^{\circ}C$) de $50^{\circ}C$ ($HU_{50} = 0,8108.HU_{42} + 3,7951$; $R^2 = 0,7875$) 61
- Figura 17 - Comparação do efeito da elevação da temperatura máxima (T_M , $^{\circ}C$) de $42^{\circ}C$ para $50^{\circ}C$ nas unidades de calor efetivo diário (HU , $^{\circ}C.dia.dia^{-1}$), em Teresina-PI, para cada dia do ano (j), referente ao período de 1 de janeiro a 30 de abril (safras 2006/2007, 2007/2008 e 2008/2009)..... 61
- Figura 18 - Unidades de calor efetivo diário (HU , $^{\circ}C.dia.dia^{-1}$) em função da temperatura média (T_{md} , $^{\circ}C$) com a temperatura máxima de $42^{\circ}C$ (T_M , $^{\circ}C$) (T_b : temperatura basal - $8^{\circ}C$) com a elevação da temperatura ótima (T_O , $^{\circ}C$) para $33^{\circ}C$ 63

- Figura 19 - Influência da temperatura ótima (T_O , °C) de 33°C nas unidades de calor efetivo diário (HU_{33} , °C.dia.dia⁻¹) das fases 1 e 2 (emergência ao florescimento) para Teresina-PI em relação às unidades de calor efetivo diário (HU_{30} , °C.dia.dia⁻¹) utilizando a temperatura ótima (T_O , °C) de 30°C ($HU_{33} = 0,7657.HU_{30} + 5,5541$; $R^2 = 0,297$)64
- Figura 20 - Influência da temperatura ótima (T_O , °C) de 33°C nas unidades de calor efetivo diário (HU_{33} , °C.dia.dia⁻¹) das fases 1 e 2 (emergência ao florescimento) para Santo Antônio de Goiás-GO em relação às unidades de calor efetivo diário (HU_{30} , °C.dia.dia⁻¹) utilizando a temperatura ótima (T_O , °C) de 30°C ($HU_{33} = 1,147.HU_{30} + 2,0333$; $R^2 = 0,8586$).....64
- Figura 21 - Unidades de calor efetivo diário (HU , °C.dia.dia⁻¹) em função da temperatura média (T_{md} , °C) (T_b : temperatura basal - 8°C e T_M : temperatura máxima - 42°C) com a adição de uma faixa de variação para a temperatura ótima (T_O , °C)65
- Figura 22 - Valores observados (*obs*) e simulados (*sim*), pelo modelo ORYZA-APSIM, de massa de matéria seca total (MST , kg.ha⁻¹) e de folhas verdes (MSF , kg.ha⁻¹), do índice de área foliar (IAF , m².m⁻²) e da produtividade (P , kg.ha⁻¹) em função dos estádios de desenvolvimento (DVS) do arroz de terras altas (cv. BRS-Primavera) para as condições climáticas ocorridas entre 17 de novembro de 2008 e 12 de março de 2009 em Santo Antônio de Goiás-GO.....66
- Figura 23 - Valores observados (*obs*) e simulados (*sim*), pelo modelo ORYZA-APSIM, de massa de matéria seca total (MST , kg.ha⁻¹) e de folhas verdes (MSF , kg.ha⁻¹), do índice de área foliar (IAF , m².m⁻²) e da produtividade (P , kg.ha⁻¹) em função dos estádios de desenvolvimento (DVS) do arroz de terras altas (cv. BRS-Primavera) para as condições climáticas ocorridas entre 29 de dezembro de 2008 e 12 de abril de 2009 em Santo Antônio de Goiás-GO.....68

Figura 24 - (A) estresse hídrico simulado pelo modelo nas três primeiras camadas do solo (0-30 cm) entre os estádios de desenvolvimento *DVS* 0,73 e *DVS* 1,12 e as características das variáveis hídricas, *umidade de saturação* (θ_s ; $\text{m}^3.\text{m}^{-3}$), *umidade de capacidade de campo* (θ_{cc} ; $\text{m}^3.\text{m}^{-3}$) e *umidade de ponto de murcha permanente* (θ_{pmp} ; $\text{m}^3.\text{m}^{-3}$) de cada camada: (i) umidade simulada e observada da primeira camada (0-10 cm) e as variáveis $\theta_s = 0,47 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$, $\theta_{cc} = 0,35 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ e $\theta_{pmp} = 0,20 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$; (ii) umidade simulada e observada da segunda camada (10-20 cm) e as variáveis $\theta_s = 0,42 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$, $\theta_{cc} = 0,35 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ e $\theta_{pmp} = 0,23 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$; (iii) umidade simulada e observada da terceira camada (20-30 cm) e as variáveis $\theta_s = 0,41 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$, $\theta_{cc} = 0,32 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ e $\theta_{pmp} = 0,20 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$. (B) efeitos do estresse hídrico sobre as variáveis *MST*, *MSF* e *IAF* simuladas pelo modelo entre os estádios de desenvolvimento *DVS* 0,73 e *DVS* 1,12.. 70

Figura 25 - Correlação entre produtividade simulada (P_s , $\text{kg}.\text{ha}^{-1}$) e observada (P_o , $\text{kg}.\text{ha}^{-1}$) em quatro diferentes regiões (Santo Antônio de Goiás-GO, Sorriso-MT, Gurupi-TO e Teresina-PI) produtoras de arroz de terras altas (Tabela 11) (* Significativo ao nível de 10% - $r_{c(\alpha=0,10,gl=9)} = 0,521$) (SIEGLE, 2009) 71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características da variedade cultivada de arroz de terras altas BRS-Primavera	31
Tabela 2 - Algumas características da biossíntese de cinco grupos de compostos orgânicos: (A) gastos com biossíntese (g de carboidrato por g do produto), (B) gastos com transporte (g de carboidrato g do produto), (C = A + B) gastos de conversão (g de carboidrato g do produto) e (D = 1/C) (g produto por g de carboidrato).....	38
Tabela 3 - Composição química (valores médios de alguns cereais), em carboidrato (<i>CHO</i> , %), proteína (<i>PRO</i> , %), gordura (<i>GOR</i> , %), lignina (<i>LIG</i> , %), ácidos orgânicos (<i>AOR</i> , %) e minerais (<i>MIN</i> , %), e fator de conversão (<i>CVF</i> , g.g^{-1} - g do produto por g de carboidrato).....	38
Tabela 4 - Variáveis de entrada do modelo ORYZA-APSIM.....	43
Tabela 5 - Análise química do solo (pH em água), teores de cálcio (Ca), magnésio (Mg), alumínio (Al) e hidrogênio e alumínio (H+Al) ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$), de fósforo (P), potássio (K), cobre (Cu), zinco (Zn), ferro (Fe) e manganês (Mn) ($\text{mg}.\text{dm}^{-3}$) e matéria orgânica (MO, $\text{g}.\text{dm}^{-3}$).....	44
Tabela 6 - Valores das variáveis utilizadas na calibração do modelo para as duas datas de emergência dos experimentos.....	47
Tabela 7 - Valores observados das frações ($\text{kg}.\text{kg}^{-1}$) da massa de matéria seca dos órgãos (<i>FLV</i> : folhas, <i>FST</i> : colmos, e <i>FLO</i> : órgãos de armazenagem) em diferentes estádios de desenvolvimento (<i>DVS</i>) utilizados na calibração do modelo	49
Tabela 8 - Parâmetros (<i>A</i> , <i>B</i> , <i>C</i> e <i>D</i>) empíricos referentes à estimativa da área foliar específica, fração da massa de matéria seca de colmos de reserva (<i>FSTR</i> , $\text{kg}.\text{kg}^{-1}$) e taxa de crescimento relativo da área foliar (<i>RGRL</i> , $(^\circ\text{C}.\text{dia})^{-1}$)	54
Tabela 9 - Valores médios mensais da temperatura máxima (T_M , $^\circ\text{C}$), mínima (T_m , $^\circ\text{C}$) e médias (T_{md} , $^\circ\text{C}$) dos municípios de Santo Antônio de Goiás-GO e Teresina-PI.....	58
Tabela 10 - Valores observados (<i>obs</i>) e simulados (<i>sim</i>), para as temperaturas máximas (T_M , $^\circ\text{C}$) de 42 e 50 $^\circ\text{C}$, do número de ordem do dia do ano referente à emergência (<i>DE</i>) e ao florescimento (<i>DF</i>), número de dias entre a emergência e o florescimento (<i>DEF</i> , dia) e diferença entre o valor observado e simulado do número de dias entre a emergência e o florescimento (ΔDEF , dia). Teresina-PI.....	62

Tabela 11 - Erros relativos (E, %) e absolutos ($P_s - P_o$, $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) e valores observados (P_o , $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) e simulados (P_s , $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) da produtividade para diferentes regiões (Santo Antônio de Goiás-GO, Sorriso-MT, Gurupi-TO e Teresina-PI) produtoras de arroz de terras altas em função do dia da emergência nos diferentes locais e safras 71

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, o consumo de arroz no Brasil tem crescido substancialmente, o que tem demandado um aumento na produtividade e áreas produtoras. Entretanto, a produção Brasileira encontra-se concentrada na região sul, merecendo destaque o Estado do Rio Grande do Sul, maior produtor nacional, onde o arroz é produzido essencialmente no sistema de várzeas inundadas (irrigado). A Região Sul atualmente é responsável por mais de 60% da produção nacional do cereal. Dos 12,7 milhões de toneladas produzidos na safra 2008/2009, somente no Rio Grande do Sul, foram produzidas 7,8 milhões de toneladas (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2009).

Nas várzeas irrigadas do Rio Grande do Sul, são cultivados anualmente com arroz, cerca de 1,1 milhões de hectares, cuja produção supre mais da metade da demanda nacional (EMBRAPA, 2005a; 2005b; 2005c). Todavia, o aumento da área de produção do arroz irrigado no Estado do Rio Grande do Sul vem sendo limitado por restrições socioambientais, que visam garantir a disponibilidade da água nos centros urbanos (indústrias e domicílios) em constante aumento de demanda, e restringir a contaminação dos recursos hídricos locais, onde o cultivo do arroz irrigado é a maior fonte de poluição dos recursos hídricos. Outro fato importante a ser considerado a favor da restrição ao aumento da área de produção do arroz na região é que, caso não ocorram restrições, a concentração da produção do cereal nesse local pode tornar-se ainda maior, podendo ocasionar sérios riscos de desabastecimento do cereal caso venham a ocorrer fatores climáticos que não possibilitem a uma produtividade satisfatória da cultura na região. Diante deste contexto, existe um grande interesse na melhoria do sistema de produção do arroz de terras altas no Brasil. Entretanto, a média nacional de produtividade do arroz de terras altas é de apenas 1800 kg.ha^{-1} , muito abaixo da média do arroz irrigado, que é de aproximadamente $6,11 \text{ t.ha}^{-1}$ (INSTITUTO RIOGRANDENSE DO ARROZ - IRGA, 2008). Essa diferença é devida principalmente à grande variabilidade de solos, clima e baixa utilização de tecnologias apropriadas para esse sistema de produção. Assim, torna-se importante otimizar a utilização dos recursos naturais, isto é, (i) clima (precipitação pluvial, radiação solar global e temperatura); (ii) solo (características físico-hídricas) e (iii) planta (características fenotípicas), que influenciam no desenvolvimento da cultura no ambiente (sistema solo-água-planta) de produção. A otimização dos recursos naturais, aliado as práticas de manejo adequadas, adaptadas aos diferentes ambientes inseridos no sistema de produção de arroz de terras altas pode contribuir para minimizar a

variabilidade temporal e espacial da produtividade. Uma das maneiras de aperfeiçoar o sistema de produção de arroz de terras altas é através de experimentações para identificar o potencial produtivo de genótipos em uma determinada região, bem como das práticas culturais adotadas nesse processo produtivo. Essas experimentações demandam muito tempo e recursos, tornando-se muitas vezes caras e demoradas. Uma alternativa viável para diminuir o tempo e o recurso gasto nesse processo seria a utilização de modelos de simulação de desenvolvimento e produção de culturas, que segundo Andrade Júnior et al. (2006) apresentam as vantagens de economizar tempo, trabalho e quantidade de recursos para planejamento e tomada de decisões de manejo no setor agrícola.

Os modelos de simulação podem determinar tendências no comportamento da cultura sob diferentes condições de cultivo. Eles podem ser utilizados para integrar os conhecimentos dos processos biofísicos que regem o sistema solo-água-planta, permitindo identificar e avaliar as incertezas na produção, associadas às diferentes opções de manejo. Os modelos também tornam possível aperfeiçoar a eficiência da pesquisa, permitindo a análise do desempenho de variedades cultivadas em diferentes solos, condições climáticas, datas de semeadura, densidades de plantas, manejo da irrigação e épocas de aplicação de nitrogênio (HEINEMANN et al., 2000; 2002; ZHANG et al., 2007). Além disso, permitem estudos do impacto das mudanças climáticas e quantificação das interações Genótipo x Ambiente x Manejo, particularmente sob situações com variabilidade climática (CHAPMAN et al., 2000; TAO et al., 2008 e HEINEMANN et al., 2008a), como também, identificação e avaliação de características desejáveis em um determinado genótipo, conduzindo a um ideotipo de planta ideal para um determinado ambiente (HEINEMANN et al., 2008b). Um desses modelos é o ORYZA2000, que foi desenvolvido pela Universidade de Wageningen e o Instituto Internacional de Pesquisa em Arroz (IRRI) nos anos 90. Tal modelo simula a dinâmica do crescimento e desenvolvimento da cultura do arroz irrigado para condições ótimas, que levam ao rendimento potencial (KROPFF et al., 1994), para condições limitantes de nitrogênio ou para a otimização da aplicação de nitrogênio (BOUMAN; VAN LAAR, 2006). Recentemente, o modelo ORYZA2000 foi incorporado ao sistema de suporte de decisão APSIM (*Agricultural Production Systems Simulator*). O sistema APSIM vem sendo utilizado para embasar decisões agronômicas e alocação de recursos na Austrália para a cultura do arroz, como também para rotações de culturas (ZHANG et al., 2004; GAYDON; LISSON; XEVI, 2006). A incorporação do ORYZA2000 ao sistema de suporte de decisão

APSIM foi designada para a simulação de sistemas agrícolas complexos e de seus respectivos manejos, possibilitando o uso do modelo para o sistema de cultivo do arroz de terras altas. O modelo ORYZA-APSIM permite a realização de estudos sobre a sustentabilidade do sistema de produção de arroz, simulando o comportamento da cultura sob diferentes condições de solos, climas e manejo. Um modelo de simulação, quando bem calibrado e avaliado para um determinado sistema de cultivo pode, dentre outras coisas, determinar tendências do desenvolvimento, crescimento e produtividade de genótipos sob diferentes condições ambientais. A identificação e calibração dos coeficientes de sensibilidade relacionados aos fatores fenológicos e ambientais são de fundamental importância para a obtenção de modelos agrometeorológicos de estimativa de produtividade mais consistentes, os quais são dependentes dos níveis hierárquicos de estimativa de produtividade, como para planta, talhão, município ou região (SANTOS; CAMARGO, 2006).

Diante do contexto apresentado anteriormente, foi levantada a seguinte hipótese: o modelo de simulação ORYZA-APSIM pode caracterizar o desenvolvimento, crescimento e a ordem de grandeza da produtividade da variedade cultivada de terras altas BRS-Primavera com base nos dados do genótipo, solo e clima (características do ambiente de diferentes regiões produtoras de arroz de terras altas).

O objetivo deste trabalho foi calibrar e avaliar o desempenho do modelo ORYZA-APSIM na simulação do desenvolvimento, crescimento e produtividade da variedade cultivada de arroz de terras altas BRS-Primavera nas condições ambientais de quatro diferentes regiões produtoras de arroz no Brasil.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Importância econômica e social da cultura do arroz

O arroz (*Oryza sativa* L.) é considerado o alimento mais importante para a segurança alimentar do mundo, pois além de fornecer um excelente balanceamento nutricional é uma cultura extremamente rústica, o que faz dela a espécie de maior potencial de aumento de produção para o combate da fome no mundo (BARATA, 2005).

O arroz é o alimento básico da dieta da maior parte da população mundial, e o mais importante na maioria dos países subdesenvolvidos e/ou em desenvolvimento, sendo que a sua cadeia produtiva é capaz de influenciar diretamente na renda, saúde, meio ambiente e no bem estar social dessas populações. O arroz é o terceiro cereal mais produzido no mundo, atrás apenas do trigo e do milho (USDA, 2005), e constitui o alimento básico de aproximadamente 2,4 bilhões de pessoas no mundo (LUZZARDI et al., 2005).

“Nenhuma outra atividade econômica alimenta tantas pessoas, sustenta tantas famílias, é tão crucial para o desenvolvimento de tantas nações e apresenta mais impacto sobre o nosso meio ambiente. A produção de arroz alimenta quase a metade do planeta todos os dias, fornece a maior parte da renda de milhões de habitações rurais pobres, pode derrubar governos e cobrir 11% da terra arável do planeta” (CANTRELL, 2002).

No Brasil, o arroz assume papel de destaque por constituir fonte importante de calorias e de proteínas na dieta alimentar da população (FORNASIERI FILHO; FORNASIERI, 2006). A área plantada de arroz no mundo é de 156,688 milhões de hectares, com uma produção de 650,2 milhões de toneladas (ARROZ BRASILEIRO, 2009b). O Brasil está entre os dez principais produtores mundiais de arroz (EMBRAPA, 2005a,b,c), respondendo por aproximadamente, 1,8% da produção mundial e 52% da América do Sul (AZAMBUJA et al., 2004). Apesar de grande produtor o Brasil também se encontra entre os dez maiores importadores, absorvendo cerca de 5% do volume das exportações mundiais, com um consumo médio entre 74 a 76 kg por habitante por ano de arroz, tomando-se por base o grão em casca (EMBRAPA, 2005a,b,c).

A lavoura orizícola tem grande importância econômica para o Brasil. O setor arrozeiro destaca-se como o terceiro maior em produção de grãos, atrás apenas da soja e do milho. No ano

de 2000, a produção do cereal gerou um valor de R\$ 3,34 bilhões, que representou 6,7% do valor bruto da produção agrícola nacional (R\$ 49,75 bilhões), ficando atrás da soja, cana-de-açúcar, milho e café respectivamente (EMBRAPA, 2005a,b,c).

Neste contexto, a rizicultura ocupa uma posição de destaque no agronegócio brasileiro (FERREIRA; VILAR, 2003). Para se ter uma idéia de sua importância, segundo dados de (ARROZ E PECUÁRIA, 2009), somente no Rio Grande do Sul, entre o período de 1999 a 2002, o setor orizícola movimentou a economia de 133 municípios, mobilizou 18 mil produtores, 300 indústrias, gerando 190 mil empregos diretos e 30 mil indiretos, representou 3% do PIB total do Estado, contribuindo com 20% do ICMS arrecadado nesse período. Em escala nacional, no período de 2002 a 2006, a produção de arroz correspondeu em média, a 6,25% da renda agrícola total, e em 2006 movimentou R\$ 4,3 bilhões em receita bruta, mobilizando cerca de 93.000 agricultores em todo o país (COSTA, 2008).

O crescimento acelerado da população mundial está aumentando a demanda do produto em proporções não compatíveis com o crescimento da produção, ou seja, a produção mundial de arroz não vem acompanhando o crescimento do consumo. Nos últimos seis anos, a produção mundial aumentou 1,09% ao ano, enquanto que a população cresceu 1,32% e o consumo 1,27%, levando a uma grande preocupação em relação à estabilização da produção mundial (SANTOS; RABELO, 2004). No Brasil vem ocorrendo processo semelhante, o consumo vem aumentando de forma superior ao aumento da demanda. O consumo brasileiro previsto para o ano de 2009 é de 13,2 milhões de toneladas, enquanto que a safra projetada é de 12 milhões (ZEBU PARA O MUNDO, 2008). De acordo com projeções da Conab (2009) para o ano de 2009, os estoques finais de arroz no Brasil devem reduzir em torno de 24%, e o país deverá importar mais de um milhão de toneladas. A lacuna entre a produção e o consumo anual de arroz deverá ser suprida principalmente pelo Uruguai e Argentina, que exportam arroz para o Brasil desde a década de 90, e são responsáveis por cerca de 85 a 90% das importações atuais deste cereal (EMBRAPA, 2005a,b,c).

A produção de arroz brasileira na safra 2008/2009 foi de 12,177 milhões de toneladas, para uma área plantada de 2,874 milhões de hectares, com uma produtividade média de 4.236 kg.ha⁻¹ (ARROZ BRASILEIRO, 2009a). A região Sul do Brasil (RS, SC e PR) é a principal produtora, cuja produção média representa cerca de 60% do total produzido no País. O Rio Grande do Sul é o maior produtor Nacional, respondendo por 77% do arroz irrigado colhido no

país (AZAMBUJA et al., 2004), e responsável por mais da metade da produção nacional do grão (EMBRAPA, 2005a,b,c). No Rio Grande do Sul, a área cultivada com arroz nos últimos anos é de mais de 1 milhão de hectares e a produtividade média de 6,11 t.ha⁻¹ (IRGA, 2008). De acordo com dados da Conab (2009), na safra 2008/2009, o estado produziu 7,8 milhões de toneladas de arroz, contribuindo com aproximadamente 68% da produção nacional.

2.2 Restrições ao cultivo do arroz irrigado no Rio Grande do Sul

Atualmente, devido às perspectivas de um possível desabastecimento de água potável em um futuro próximo, inúmeros apelos de setores organizados da sociedade têm ocorrido, exigindo um maior controle na gestão dos recursos hídricos nas atividades agrícolas. De acordo com Chaves e Oliveira (2004) aproximadamente 70% de toda a água potável do planeta utilizada pelo homem, é destinada à irrigação, e 40% dos alimentos são produzidos sob este sistema.

Atualmente, em muitos casos, não existe mais opção para ampliar ou até mesmo continuar a prática da agricultura sob as condições atuais de irrigação (RDH, 2006a), principalmente considerando as questões relacionadas a impactos ambientais decorrentes do uso indiscriminado de defensivos agrícolas (KIJNE, 2006; LIU; LAFITTE; GUAN, 2004; RDH, 2006b).

Segundo dados de Ferreira (2004) em seu relatório: “O Estado Real das Águas no Brasil-2003-2004”, a contaminação das águas dos rios, lagos e lagoas no Brasil aumentou cinco vezes nos últimos 10 anos. O relatório também menciona que a atividade agrícola é uma das que mais contribui para a contaminação dos recursos hídricos no Estado do Rio grande do Sul. A utilização de fertilizantes e defensivos nas lavouras de arroz irrigado no Rio Grande do Sul tem causado sérios impactos nos recursos hídricos, principalmente considerando que a água utilizada na irrigação retorna aos mananciais sem nenhum tipo de tratamento. O orizicultura é uma fonte potencial de poluição e também de redução da disponibilidade hídrica no Estado do Rio Grande do Sul (ANA, 2009).

Tornam-se cada dia mais evidente as imposições de barreiras ao uso da água nos sistemas cultivo irrigado nas mais diversas localidades do planeta. A utilização dos recursos hídricos nas atividades agrícolas localizadas em regiões com considerável densidade demográfica e/ou próximos aos centros urbanos estão sofrendo reduções. Na Ásia, onde tradicionalmente o arroz é cultivado sob sistema de várzeas irrigadas (inundado), o aumento da população e a crescente urbanização têm gerado significativa redução da disponibilidade de água para irrigação (LAFITTE et al., 2006).

No Estado do Rio Grande do Sul existem problemas graves em relação à disponibilidade de água em algumas bacias hidrográficas, o que tem acarretado um processo de valorização dos recursos hídricos, mobilizando vários dos agentes envolvidos neste processo, levando a criação dos comitês das bacias hidrográficas, que são os responsáveis pelo gerenciamento dos recursos hídricos (ZAFARONI; TAVARES, 2009).

Atualmente, surge à necessidade de se priorizar a utilização da água para fins mais importantes, como o abastecimento dos centros urbanos, gerando uma redução gradativa da água disponível para a irrigação. Em virtude da grande necessidade de água e baixa eficiência da irrigação nos sistemas de inundações, a disponibilidade de água para o cultivo do arroz tem sido fator limitante para sua expansão (TOESCHER; RIGHES; CARLESSO, 1997).

A produção de arroz em várzeas inundadas requer aproximadamente 2000 litros de água para cada kg de grãos em casca produzido, situando-se entre as culturas mais exigentes em termos de consumo dos recursos hídricos (EMBRAPA, 2005a,b,c).

A área cultivada com arroz no Rio Grande do Sul é de aproximadamente 950.000 ha⁻¹, consumindo cerca de 15 bilhões de m³ de água por safra (IRGA, 2008). Somente na bacia hidrográfica do sistema Mirim-Mangueira, o cultivo do arroz irrigado é responsável por cerca de 99,8% do consumo da disponibilidade hídrica desta bacia (ANA, 2009).

Outro fator importante a ser considerado é, o risco de desabastecimento do cereal caso ocorram fatores climáticos adversos a uma produtividade satisfatória na região, uma vez que a região é responsável por mais da metade da produção do grão. Nos últimos anos, o surgimento de anomalias climáticas como os fenômenos *El Niño* e o *La Niña*, juntamente com indícios de prováveis mudanças climáticas no planeta (Aquecimento Global), evidenciam a necessidade de se expandir o cultivo do arroz para outras regiões do país, descentralizando a produção e diminuindo os riscos de um possível desabastecimento. Fioravante (2008) afirma que a produção agrícola mundial deve cair mesmo com um pequeno incremento de 1°C ou 2°C na temperatura média anual, e com variações de até 5°C a produção de arroz e trigo poderia cair pela metade em alguns países.

Uma alternativa viável para se diminuir os riscos de desabastecimento do cereal é a expansão do cultivo de arroz para as Regiões Centro-Oeste, Norte e Nordeste do Brasil, onde o arroz é produzido principalmente no sistema de terras altas.

“Vale ressaltar que o Brasil detém vantagem comparativa em relação aos outros países produtores de arroz, por ser o único em que o ecossistema de terras altas apresenta a mesma importância que o irrigado, permitindo ajustar melhor a área cultivada às alterações de demanda do produto” (PINHEIRO, 2002).

2.3 O arroz de terras altas

No ecossistema de terras altas, o arroz é cultivado sem ou com irrigação suplementar, enquanto que no ecossistema de arroz irrigado, o cultivo ocorre com irrigação por inundação ou subirrigação. Portanto, a denominação de arroz de terras altas deve-se basicamente ao fato de que nesse sistema de produção o cultivo não ocorre em solos hidromórficos de baixadas (várzeas inundadas), e não utiliza sistema de irrigação por inundação e/ou subirrigação, comumente utilizado no sistema de várzeas irrigadas. Ao contrário do sistema de várzeas irrigadas, o arroz de terras altas é cultivado em solos de boa drenagem, topografia suave ondulada a moderada, sob condições climáticas favoráveis, como temperatura e pluviosidade e podendo ou não lançar mão da utilização de sistemas de irrigação suplementar, como pivô central, autopropelido e canhões de aspersão (ALVAREZ et al., 2006).

A cultura do arroz de terras altas apresenta algumas vantagens no cultivo quando comparadas ao arroz irrigado. A produção do arroz de terras altas é uma alternativa mais rentável e eficiente que o cultivo do arroz de várzeas irrigadas (SPOHR, 2003). Esse sistema de produção apresenta melhor rentabilidade por ser menos exigente em insumos e nível tecnológico, ser tolerante a solos ácidos, apresenta menores custos de implantação e maior eficiência de uso da água (PINHEIRO, 2003).

Devido a essas características, o arroz de terras altas teve um destacado papel como cultura pioneira durante o processo de ocupação agrícola dos cerrados na região central do país, tendo seu pico no período 1975 a 1985, onde a cultura chegou a ocupar uma área superior a 4,5 milhões de hectares (PINHEIRO, 2003).

O sistema de exploração utilizado no período de ocupação dos cerrados caracterizava-se pela baixa produtividade, devido à utilização de práticas não recomendadas, como semeaduras tardias. A significativa ocorrência de veranicos fazia com que a produtividade média da cultura fosse muito baixa, ao redor de 1 t.ha^{-1} (PINHEIRO, 2003). A baixa tecnologia normalmente utilizada no sistema de produção de terras altas, aliada a deficiência hídrica e alta demanda

evapotranspirativa da cultura durante o ciclo de cultivo, reduzem a produtividade e podem causar até a perda total da lavoura (ARF et al., 2000). Esses períodos de estiagem durante o ciclo da cultura causam decréscimo na produção da matéria seca total e produtividade de grãos (STONE; PEREIRA, 1994 e CRUSCIOL et al., 2003a,b).

A baixa produtividade ocasionada pelos veranicos, a dificuldade na abertura de novas áreas, o avanço da pecuária e o maior interesse pelo cultivo de outros grãos, levaram a diminuição da área plantada com arroz de terras altas nas regiões dos cerrados durante as duas últimas décadas. Apesar da expressiva redução da área cultivada (-50%), que hoje perfaz apenas 2,2 milhões de hectares, a produção manteve-se nos mesmos níveis das décadas de 70 e 80, devido a melhorias das práticas culturais adotadas que refletiram no aumento da produtividade para 2 t.ha^{-1} (PINHEIRO, 2003).

Esse aumento da produtividade média é bastante animador, contudo ainda está muito aquém do que é possível obter no sistema de cultivo de terras altas. Em lavouras bem conduzidas, em áreas favorecidas quanto à distribuição de chuvas, como no Centro-Norte do MT, pode-se alcançar mais de 4 t.ha^{-1} , enquanto que em nível experimental, tem-se obtido até 6 t.ha^{-1} (PINHEIRO, 2003).

A abertura de novas fronteiras agrícolas continua sendo uma importante atribuição dada ao arroz de terras altas, que normalmente antecede a implantação de pastagens e lavouras de soja e milho nas regiões Centro-Oeste e Norte do país (CEPEA, 2002). Entretanto, nos últimos anos a abertura de novas áreas agrícolas nas regiões dos cerrados vem sofrendo sérias restrições, devido principalmente ao não enquadramento de muitas propriedades rurais nas exigências dos órgãos ambientais que concedem as licenças para a abertura de novas áreas de exploração. Essas restrições acabaram forçando os produtores de arroz a aperfeiçoarem o sistema de produção de terras altas, onde o arroz começou a tomar lugar de destaque e importância dentro dos sistemas de produção de soja, milho e na integração lavoura-pecuária, passando a ser cultura de cultivo contínuo, safrinha e de rotação. Os números apontam para a expansão da produção de arroz de terras altas no Brasil, devido à profissionalização do setor e ao desenvolvimento de tecnologias agrícolas mais apropriadas (MORAIS et al., 2005). Atualmente está ocorrendo à tendência de um efeito contrário do ocorrido anteriormente, aonde o arroz como componente de sistemas agrícolas vem ocorrendo de forma gradual, especialmente nas regiões Centro-Oeste e Norte do País (REIS et al., 2008).

Atualmente, aproximadamente 60% das áreas ocupadas com a orizicultura no Brasil, localizam-se em regiões onde o arroz é produzido sob o sistema de terras altas (CRUSCIOL; SORATO; ARF et al., 2007). Na zona tropical brasileira, o cultivo de arroz de terras altas predomina em relação ao irrigado (MORAIS et al., 2005).

Além do bom rendimento nessas novas condições de cultivo, o arroz de terras altas também promove o melhor desempenho de outras culturas, como a soja e o milho, quando utilizado em rotação e/ou sucessão. Torna-se evidente a grande demanda atual para o uso do arroz de terras altas em sistema de plantio direto, sobretudo em regiões favorecidas com boa distribuição da precipitação pluvial ou sob pivô central, com perspectivas de altas produtividades, haja vista a grande área usada atualmente com plantio direto de milho e soja, onde o arroz se apresenta como uma boa alternativa de rotação (REIS et al., 2008).

Atualmente, tem-se observado o aumento do plantio do arroz de terras altas em áreas comerciais, a melhoria da qualidade do grão e a redução das diferenças entre o arroz de terras altas e o irrigado, assim como o incremento da produtividade deste, decorrente do desenvolvimento de novas variedades cultivadas (CEPEA, 2002).

Após longo período de declínio da produção do arroz de terras altas no Brasil, novos horizontes estão surgindo com o desenvolvimento de novas variedades cultivadas de arroz adaptadas ao cultivo em terras altas (SOARES et al., 2001).

2.4 A variedade cultivada de arroz de terras altas BRS-Primavera

A variedade cultivada BRS-Primavera é uma das variedades cultivadas de terras altas mais importantes, sendo a mais plantada na maioria das regiões produtoras. Trata-se de uma variedade cultivada produtiva e com ampla adaptação a diferentes sistemas agrícolas, tais como o Sistema Barreirão, de rotação com soja, de plantio em áreas irrigadas com pivô central dentre outros (LANA; FERREIRA; BARRIGOSSO, 2003).

Essa variedade cultivada foi desenvolvida pela EMBRAPA *Arroz e Feijão* por intermédio de cruzamentos realizados entre as linhagens IRAT-10 e a LS-85-185, em 1987, tendo como pedigree a denominação CNAX-3608-6-1-2-1. Posteriormente recebeu o código CNA 8070, com o qual foi distribuído para compor experimentos das instituições Estaduais para avaliações regionais (SOARES et al., 2008). Em 1997 foi lançada e recomendada como variedade cultivada BRS-Primavera, significando grande avanço na qualidade do grão tipo agulhinha (longo fino), para as condições de terras altas.

A variedade cultivada BRS-Primavera apresenta ciclo de maturação considerado precoce, de 100 a 105 dias, podendo variar em alguns dias em função das condições climáticas ocorridas durante seu cultivo.

Trata-se de uma variedade cultivada do tipo moderno com crescimento inicial moderado, apresenta semente lisa e sem arista, de coloração amarelo-palha, degranação intermediária e floração média em torno de 85 dias, tendo seu período crítico entre 60 e 90 dias após a emergência (SOARES et al., 2001). A variedade cultivada apresenta altura intermediária (média de 101 cm), perfilhamento médio, baixa resistência ao acamamento, sobretudo em plantios em solos de boa fertilidade ou com elevada adubação, é susceptível à brusone, apresenta resistência moderada a escaldadura das folhas e mancha dos grãos (SOARES et al., 2001).

A variedade cultivada BRS-Primavera é indicada para plantio em áreas de abertura e em áreas velhas, pouco ou moderadamente férteis, devido à sua tendência ao acamamento em condições de alta fertilidade. Pode também ser plantada em solos férteis, desde que os fertilizantes sejam utilizados com moderação (SOARES et al., 2001).

A variedade cultivada BRS-Primavera é sensível a herbicidas, possui bom potencial produtivo e é uma das preferidas pela indústria por possuir excelente qualidade de grão, pequena maturação pós-colheita e ótimo desempenho de panela (SOARES et al., 2001). É uma variedade cultivada com excelente qualidade culinária, contudo, para que se obtenha uma boa porcentagem de grãos inteiros no beneficiamento, é necessário que a colheita seja feita com a umidade dos grãos entre 20% e 24% (LANA; FERREIRA; BARRIGOSI, 2003).

A variedade cultivada BRS-Primavera apresenta grãos do tipo agulhinha com ótima qualidade de panela e excelente aparência, que resultam em grande aceitação do mercado e em melhores preços de comercialização (CASTRO; BRESEGHELLO; MORAIS, 2003).

Essa variedade cultivada merece atenção especial por ter se tornado referência de qualidade e extremamente competitiva com o arroz longo-fino produzido nas lavouras irrigadas do sul do país. Outra vantagem dessa variedade cultivada é que ela pode ser consumida logo após a colheita, não necessitando de tempo de armazenamento para melhorar as qualidades de cozimento do grão (LANA; FERREIRA; BARRIGOSI, 2003).

Em alguns Estados da região Centro-Oeste e Norte do país, a variedade cultivada BRS-Primavera se sobrepõe a qualquer outra, sendo a mais produzida e comercializada, devido

principalmente pela tendência do mercado, que aponta a preferência do consumidor por um arroz de melhor qualidade, como o arroz Primavera (PLANETA ARROZ, 2005).

Tabela 1 - Características da variedade cultivada de arroz de terras altas BRS-Primavera

Características	Descrição
Ano de lançamento	1997
Potencial produtivo	Médio
Genealogia	IRAT 10/LS 85-158
Ciclo (semeadura ao ponto de maturidade completa)	Curto 115 dias
Ciclo-emergência à floração (50%)	80 dias
Tipo da planta	Moderno
Cor das folhas	Verde
Pubescência	Glabra
Perfilhamento	Médio
Altura de planta	101 cm
Acamamento	Suscetível
Cor das glumelas	Amarelo palha
Cor do ápice na maturação	Marrom
Presença de aristas	Ausente
Degranação natural	Intermediário
	Resistência a doenças
Brusone da folha	Moderadamente suscetível
Brusone da panícula	Moderadamente suscetível
Mancha dos grãos	Moderadamente resistente
Escaldadura da folha	Moderadamente suscetível
	Característica do grão
Comprimento do grão descascado	7,71 mm
Largura do grão descascado	2,09 mm
Espessura do grão descascado	1,79 mm
Relação comprimento/largura	3,69
Massa de 1000 grãos com casca	24,9 g
Classe	Longo fino
Produtividade de grãos inteiros	52 %
Produtividade de grãos quebrados	18 %
Rendimento de grãos beneficiados	70 %
Temperatura de gelatinização (nota)	Intermediário
Teor de amilose	Intermediário
Protegida (registrada)	Sim

Fonte: (EMBRAPA, 2009 e SOARES et al., 2001).

“Está comprovado que à medida que o arroz tem redução de preços ou aumenta o poder de compra do consumidor, há uma migração para um produto superior” (BARATA, 2005).

A produtividade da variedade cultivada BRS-Primavera é estável e satisfatória em variadas condições de cultivo, exceto nos casos de incidência de brusone. Para a redução do risco dessa doença, recomenda-se o plantio no início das chuvas e o tratamento preventivo com fungicidas na pré-floração. A variedade cultivada é moderadamente resistente às demais doenças da cultura (EMBRAPA, 2009; BRESEGHELLO, MORAIS; CASTRO, 2006).

De acordo com Soares et al. (2001), a média de produtividade da variedade cultivada BRS-Primavera em 29 ensaios realizados durante cinco anos de cultivo foi de 3.482 kg.ha⁻¹ em cultivo sem irrigação suplementar, e de 4.283 kg.ha⁻¹ em 19 ensaios em cultivo com irrigação suplementar. Em experimento realizado em cinco municípios produtores de arroz de terras altas do Estado de Mato Grosso durante a safra 2004-2005, a variedade cultivada BRS-Primavera apresentou uma produtividade média de 3.306 kg.ha⁻¹, sendo uma boa opção para as safras seguintes (SOARES et al., 2001).

Algumas das características da variedade cultivada são detalhadas na Tabela 1.

2.5 Os modelos matemáticos de crescimento, desenvolvimento e produção

Modelos matemáticos são equações matemáticas capazes de expressar o desempenho de uma cultura ou sistema de produção. Segundo Dourado Neto (1998), quando o desempenho de um sistema é representado matematicamente por equações, tem-se então um modelo matemático definindo quantitativamente hipóteses assumidas sobre o sistema real, permitindo deduzir suas conseqüências. Um modelo matemático sintetiza nossas introspecções quanto a processos fisiológicos e ecológicos que regulam o crescimento das culturas em equações matemáticas (IRRI, 2009).

Visando obter um conhecimento mais profundo sobre as respostas da cultura ao ambiente, os modelos de simulação são utilizados como ferramenta de grande potencial na área de sistemas cultivados, pois possibilitam o estudo e entendimento do conjunto, estimando o desempenho da cultura em diferentes localidades e situações (FERREIRA; COSTA; SOUZA, 2007).

A tendência da agricultura atual é desenvolver modelos para simular o crescimento, objetivando identificar quais os fatores que limitam o crescimento e afetam diretamente na produção das culturas (LOPES et al., 2004).

Os modelos de simulação foram criados com o dever de detectar os fatores que possam limitar o cultivo, influenciando no potencial produtivo das espécies, além de, é claro, prever rendimentos em função das condições em que as culturas se desenvolvem (CARON et al., 2007). De acordo com Dourado Neto (1998), um modelo de crescimento e desenvolvimento de plantas visa, entre outras finalidades, buscar informações básicas das diversas interações planta x ambiente, maximizando o uso de recursos naturais de cada região, ou de uma determinada condição de cultivo.

Os modelos de simulação não só explicam o fenômeno estudado, mas também permitem extrapolações para condições ambientais diferentes daquelas vigentes sobre os dados utilizados para a geração dos modelos (FONSECA; FORMAGGIO; PONZONI, 2005).

Modelos de simulação do crescimento e desenvolvimento de culturas são ferramentas que foram desenvolvidas para múltiplas aplicações na pesquisa agropecuária (HOOGENBOOM; WILKENS; TSUJI, 1999; JONES et al., 2003). Previsões de safra e outras estimativas envolvendo culturas agrícolas podem ser utilizadas com grande êxito em diversas situações a partir de modelos de simulação de culturas (CARON et al., 2007).

Dentre as vantagens da utilização de modelos, destacam-se a economia de tempo, trabalho e quantidade de recursos para planejamento e tomada de decisões de manejo no setor agrícola (ANDRADE JÚNIOR et al., 2006).

A relação funcional entre crescimento e desenvolvimento relativo, em termos de graus-dia, entre fenologia e variação temporal do índice foliar, tem sido comumente utilizada com essa finalidade. Usualmente, os modelos de simulação de produtividade potencial das culturas utilizam atributos da planta relacionados à produção de fitomassa seca, tais como área foliar, crescimento e fenologia (ASSIS et al., 2006). O sucesso desta programação do fenômeno de crescimento da cultura, tanto em nível de manejo como de pesquisa, requer o conhecimento das respostas da cultura ao ambiente.

Diversos modelos para estimativa de produtividade de culturas com base em parâmetros agrometeorológicos foram desenvolvidos (FIGUEREDO JÚNIOR, 2004). A quantificação dos elementos do clima, portanto, pode ser utilizada para elaboração de modelos de simulação de

crescimento e desenvolvimento de culturas, tornando-se um importante instrumento para pesquisa, planejamento e monitoramento de culturas (PANDOLFO, 1995).

As relações entre as variáveis meteorológicas e a produção agrícola é complexa, pois podem afetar o crescimento e o desenvolvimento das plantas sob diferentes formas nas diversas fases do ciclo da cultura. Assim, modelos agrometeorológicos relacionados com o crescimento, desenvolvimento e a produtividade das culturas sob diferentes ambientes podem fornecer informações que permitam ao setor agrícola tomar decisões importantes, dessa maneira, quando utilizado corretamente torna-se uma ferramenta importante para técnicos e produtores no planejamento e na avaliação das atividades agrícolas (CARON et al., 2007).

A geração de parâmetros ou coeficientes que expressem numericamente o crescimento das culturas, bem como as variáveis meteorológicas que influenciam no crescimento e desenvolvimento, devem ser quantificadas para se estimar a potencialidade da exploração econômica das culturas (CARON et al., 2007).

Esses modelos requerem um conhecimento detalhado sobre as interações que ocorrem no sistema solo-planta-atmosfera, as quais são transferidas para sistemas de equações que quantificam as contribuições das variáveis agrometeorológicas na expressão da produtividade final das culturas agrícolas. Nestes modelos, a decisão sobre quais variáveis utilizar está baseada em robustas relações empíricas obtidas através do conhecimento experimental e em processos fisiológicos conhecidos das culturas (FONSECA; FORMAGGIO; PONZONI, 2005).

Quando um modelo é validado, ele pode ser usado na análise e interpretação de experimentos, na investigação orientada para a concepção de ideotipos de cultura, na análise de lacunas do rendimento, otimização da gestão das culturas, análise dos efeitos das alterações climáticas sobre o crescimento das culturas e no zoneamento agroclimático de uma cultura (IRRI, 2009).

2.6 O modelo ORYZA-APSIM

O modelo de simulação ORYZA-APSIM consiste na incorporação do modelo de desenvolvimento, crescimento e produtividade de arroz irrigado ORYZA2000 ao sistema de suporte de decisão APSIM (*Agricultural Production Systems Simulator*).

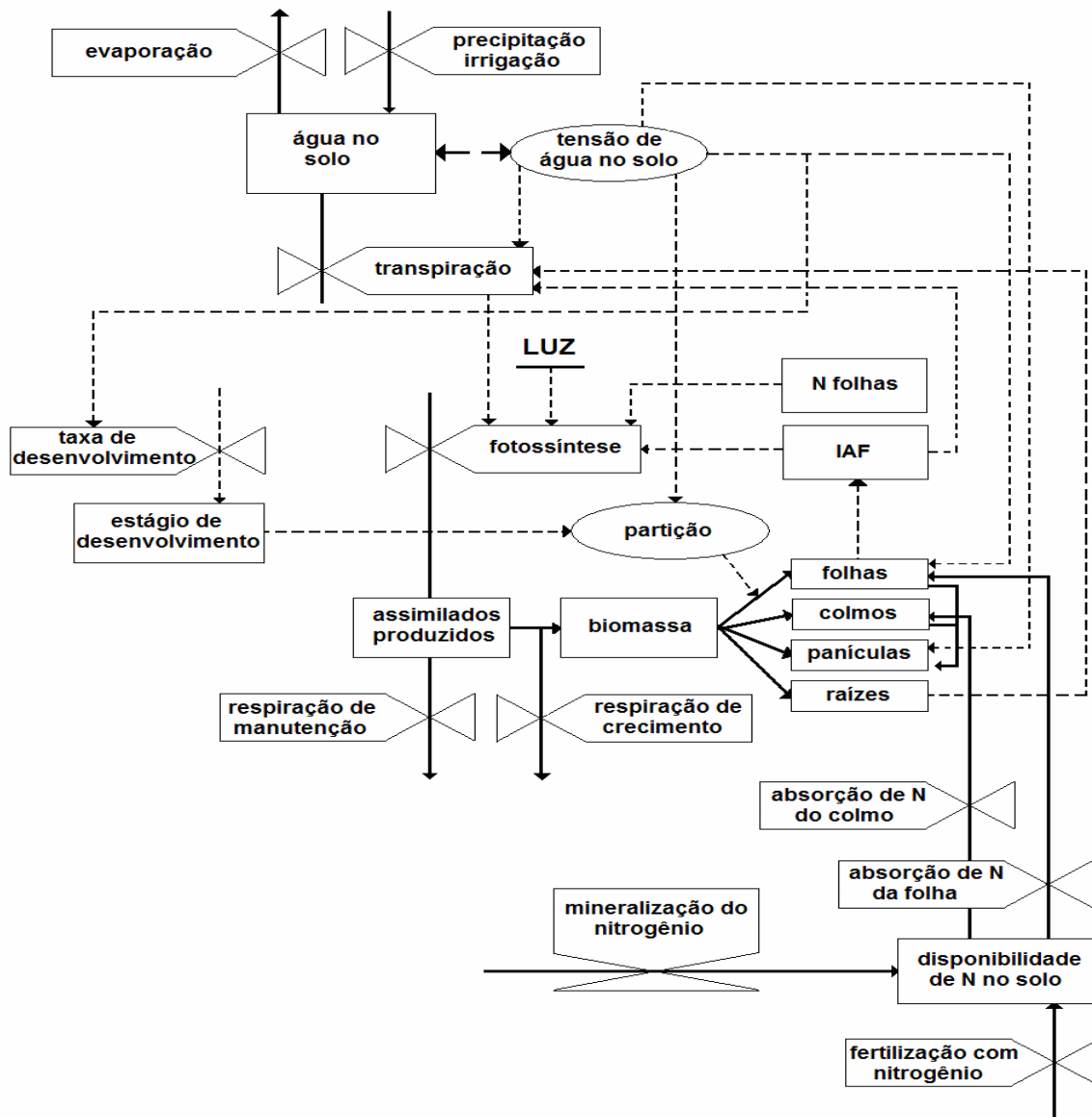


Figura 1 - Diagrama relacional do modelo ORYZA-APSIM para produção limitada por água e nitrogênio. As caixas são variáveis de estado, válvulas são taxas variáveis e círculos são variáveis intermediárias. As linhas sólidas são fluxos de material e as linhas tracejadas são fluxos de informações

Os cálculos utilizados para descrever o processo de crescimento e desenvolvimento fenológico do arroz adotado no modelo ORYZA-APSIM são os mesmos utilizados (derivados) no modelo ORYZA2000. O modelo ORYZA2000 foi desenvolvido em conjunto pela Universidade de Wageningen e o Instituto Internacional de Pesquisa em Arroz (IRRI) nos anos 90. Ele foi concebido como um sucessor para os modelos de desenvolvimento de arroz RICE-MOD e MACROS, com a adição da capacidade de gestão da irrigação e de adubos nitrogenados

(BOUMAN et al., 2001). Esse modelo simula a dinâmica do crescimento e desenvolvimento da cultura do arroz irrigado para condições ótimas, que levam ao rendimento potencial (KROPFF et al., 1994), para condições limitadas por água e nitrogênio, e para condições de diferentes doses e épocas de aplicação de nitrogênio, assumindo-se que, em todas estas situações a cultura está bem protegida e não sofre reduções de produtividade devido a doenças, pragas e plantas daninhas (BOUMAN; VAN LAAR, 2006).

Como na maioria dos modelos matemáticos de simulação de culturas, os parâmetros relacionados ao cultivo no ORYZA2000 foram obtidos de inúmeros experimentos de campo, casas de vegetação e fontes literárias, conduzidos por diferentes pessoas em diferentes localidades (BOUMAN et al. 2001).

O modelo exige que alguns parâmetros varietais específicos sejam fornecidos, como as taxas de desenvolvimento, fatores de partição de assimilados, área foliar específica, taxa de crescimento foliar relativo, taxa de morte de folha, fração de reservas do caule, e peso máximo de grãos (BOUMAN; VAN LAAR, 2006).

O modelo ORYZA-APSIM segue um regime de cálculos diários para as taxas do desenvolvimento fenológico e da produção de matéria seca dos diversos órgãos da planta. A integração das taxas de produção de matéria seca e das fases de desenvolvimento ao longo do tempo é simulada por todo o período vegetativo (BOUMAN; VAN LAAR, 2006). Uma representação do modelo é dada pela Figura 1.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Crescimento e desenvolvimento do arroz no modelo ORYZA-APSIM

O crescimento e desenvolvimento da cultura de arroz no modelo ORYZA-APSIM é determinado pelas condições de temperatura, luz e características varietais específicas. O modelo segue um esquema de cálculos diários para as taxas de produção de matéria seca dos órgãos da planta, e das taxas de desenvolvimento fenológico. Pela integração dessas taxas sobre o tempo, a produção de matéria seca é simulada por toda estação de crescimento (BOUMAN et al., 2001).

A taxa de assimilação de CO₂ do dossel é calculada em função da radiação diária total, temperatura média diária, índice de área foliar, dia do ano, latitude do local, coeficiente de extinção de luz no dossel, distribuição de nitrogênio no dossel, conteúdo de nitrogênio foliar, eficiência inicial de uso da luz e taxa máxima da assimilação de CO₂, como apresentado por (BOUMAN et al., 2001).

O modelo calcula as taxas diárias através da integração das taxas instantâneas de assimilação de CO₂ dentro das diferentes profundidades do dossel. Os cálculos são baseados assumindo-se um curso senoidal da radiação durante o dia e sua extinção exponencial dentro das camadas do dossel. A fotossíntese nos perfis do dossel é obtida com base nas características fotossintéticas de folhas unitárias, que por sua vez são dependentes da concentração de nitrogênio, radiação incidente, concentração de CO₂ no estômato e temperatura do ar. A fotossíntese líquida é obtida através da diferença entre a fotossíntese bruta e os respectivos gastos com as respirações de manutenção e crescimento. A taxa de respiração total (respiração de crescimento e de manutenção) é subtraída da taxa de assimilação bruta diária para se obter o crescimento líquido diário (kg CH₂O ha.dia⁻¹). A respiração de manutenção é obtida em função do peso seco dos órgãos a serem mantidos, dos seus respectivos coeficientes de manutenção, da sua idade fisiológica e da temperatura (PENNING DE VRIES; VAN LAAR, 1982).

A respiração de crescimento é calculada com base nos pesos dos diferentes órgãos formados, seus respectivos fatores de conversão e tipos de compostos constituintes (PENNING DE VRIES et al., 1989). Exemplos de fatores de conversão para diferentes constituintes químicos e valores médios dos fatores de conversão de diferentes órgãos de alguns cereais são demonstrados nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2 - Algumas características da biossíntese de cinco grupos de compostos orgânicos: (A) gastos com biossíntese (g de carboidrato por g do produto), (B) gastos com transporte (g de carboidrato g do produto), (C = A + B) gastos de conversão (g de carboidrato g do produto) e (D = 1/C) (g produto por g de carboidrato)

Composto	A	B	C	D = CVF ¹
Gordura	3,030	0,159	3,189	0,31
Lignina	2,119	0,112	2,231	0,45
Proteínas	1,824	0,096	1,920	0,52
Carboidratos	1,211	0,064	1,275	0,78
Ácidos Orgânicos	0,906	0,048	0,954	1,05
Minerais (K, Ca, P)	1,000	0,120	1,120	0,83

¹ CVF: fator de conversão.

Fonte: Penning de Vries et al. (1989).

Tabela 3 - Composição química (valores médios de alguns cereais), em carboidrato (*CHO*, %), proteína (*PRO*, %), gordura (*GOR*, %), lignina (*LIG*, %), ácidos orgânicos (*AOR*, %) e minerais (*MIN*, %), e fator de conversão (*CVF*, g.g⁻¹ - g do produto por g de carboidrato)

Órgão	<i>CHO</i>	<i>PRO</i>	<i>GOR</i>	<i>LIG</i>	<i>AOR</i>	<i>MIN</i>	<i>CVF</i>
Folha	52	25	5	5	5	8	0,68
Colmo	62	10	2	20	2	4	0,66
Raízes	56	10	2	20	2	10	0,68
Órgãos de armazenagem	76	12	2	6	2	2	0,70

Fonte: Penning de Vries et al. (1989).

A taxa de crescimento diário é obtida em função da taxa de assimilação bruta diária de CO₂, dos gastos com a respiração de manutenção, da quantidade de reservas disponíveis nos colmos para o crescimento e do requerimento de assimilados para a produção de matéria seca (BOUMAN et al., 2001).

A matéria seca é particionada entre os vários órgãos da planta em função do estágio de desenvolvimento e dos seus coeficientes de particionamento. A conversão dos carboidratos em matéria seca estrutural é baseada em equações obtidas por Penning de Vries e Van Laar (1982).

O desenvolvimento fenológico da cultura (*DVS*) define sua idade fisiológica, sendo caracterizado pela formação, aparecimento de órgãos e mudança na translocação de assimilados. Os estádios fenológicos básicos de desenvolvimento da cultura de arroz no modelo são assim

definidos: (i) emergência ($DVS = 0,00$); (ii) iniciação da panícula ($DVS = 0,65$); (iii) florescimento ($DVS = 1,00$); e (iv) ponto de maturidade fisiológica ($DVS = 2,00$) (Figura 2).

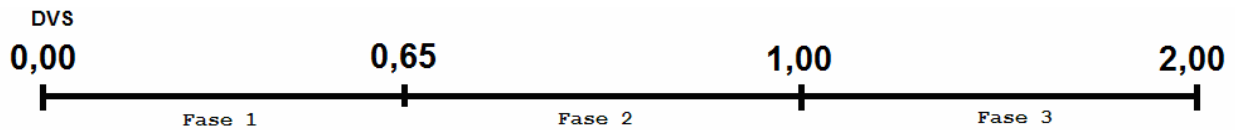


Figura 2 - Representação esquemática do desenvolvimento fenológico da cultura de arroz (DVS) nas diferentes fases: (fase 1) emergência à iniciação da panícula, (fase 2) iniciação da panícula ao florescimento e (fase 3) florescimento ao ponto de maturidade fisiológica

A temperatura é a principal fonte determinante do desenvolvimento fenológico. O desenvolvimento fenológico é dependente das unidades de calor efetivo diário HU ($^{\circ}\text{C}.\text{dia}.\text{dia}^{-1}$) e da taxa de desenvolvimento do estágio fenológico (DVR) (BOUMAN et al., 2001). O estágio de desenvolvimento (DVS) é a integral da taxa de desenvolvimento (DVR) sobre o período expressado em graus dias. A taxa de desenvolvimento é o inverso do período (expresso em $^{\circ}\text{C}.\text{dia}^{-1}$) necessário para completar uma unidade de desenvolvimento.

A área foliar apresenta duas fases de crescimento. A fase inicial de crescimento (IAF igual ou inferior a 1) apresenta um crescimento exponencial em função da soma das temperaturas multiplicada por uma taxa de crescimento foliar relativo. A segunda fase ocorre quando o (IAF é superior a 1), então o crescimento passa a ser linear e o aumento da área foliar passa a ser calculado em função da área foliar específica (peso da folha multiplicado pela área foliar) em cada estágio de desenvolvimento (BOUMAN et al., 2001). A transição da fase exponencial de crescimento para a linear é suavizada pelo uso de valores ponderados, derivados das taxas de crescimento da área foliar usando a equação exponencial e a equação linear (BOUMAN; VAN LAAR, 2006).

Da floração em diante, uma taxa de morte foliar é calculada, em função da biomassa de folhas verdes multiplicada por um fator de estresse de morte foliar obtido experimentalmente. Esta taxa da perda da folha é multiplicada por um parâmetro que expressa o efeito das limitações de nitrogênio (BOUMAN; VAN LAAR, 2006).

Durante a fase de enchimento de grãos, a produção de carboidratos pode ser superior ou inferior à capacidade de armazenamento de grãos. A demanda de assimilados dos órgãos de armazenagem é determinada pelo número máximo de grãos e a sua taxa de crescimento (BOUMAN; VAN LAAR, 2006).

O número de espiguetas em floração é calculado a partir da biomassa total acumulada nas panículas até o início da primeira floração (KROPFF et al., 1994). A esterilidade das espiguetas é atribuída a temperaturas muito altas ou muito baixas, e é ajustada pelo método descrito por Horie (1993, 1998).

Espiguetas férteis têm seus grãos preenchidos até quando seu peso máximo é atingido. No caso de limitações no dreno (grão), o carboidrato excedente é encaminhado para as hastes estruturais (BOUMAN et al., 2001).

Sob condições de produção limitada por estresse hídrico, o crescimento e o desenvolvimento da cultura são afetados (SWAIN et al., 2007). Nesse modelo são considerados 4 diferentes fatores de estresse que penalizam a produção: (i) enrolamento das folhas, (ii) redução taxa de expansão foliar, (iii) aumento da senescência foliar e (iv) esterilidades das espiguetas (BOUMAN et al., 2001).

3.2 Dinâmica da água e o balanço hídrico no modelo ORYZA-APSIM

O modelo de balanço hídrico utilizado no ORYZA-APSIM é unidimensional, com multicamadas (determinadas pelo usuário). O sistema utilizado nesse modelo (efeito cascata) é mesmo utilizado nos modelos CERES (JONES; KINIRY, 1986) e PERFECT (LITTLEBOY et al., 1992). Os algoritmos para a distribuição da água nas camadas do perfil foram herdados dos modelos da família CERES. As características da água no solo são especificadas em termos de conteúdo de água de saturação do solo (θ_s , $m^3 \cdot m^{-3}$); capacidade de campo (θ_{cc} , $m^3 \cdot m^{-3}$) e ponto de murcha permanente (θ_{pmp} , $m^3 \cdot m^{-3}$).

O movimento da água é descrito por algoritmos separados para fluxos saturados e insaturados para as diferentes camadas. Os cálculos do balanço hídrico levam em conta: (i) modificação do escoamento superficial e da evaporação potencial do solo em função da cobertura vegetal; (ii) pequenos eventos de chuva são perdidos no primeiro estágio de evaporação e não pelo processo mais lento da segunda fase da evaporação; e (iii) especificações do coeficiente de evaporação da segunda fase é usado como um parâmetro de entrada no modelo, proporcionando uma maior flexibilidade para descrever a secagem do solo a longo prazo em função da textura e dos efeitos ambientais. A simulação do balanço hídrico responde a alterações da quantidade de resíduos na superfície do solo e ao tipo de cobertura vegetal. O escoamento superficial é calculado pelo método da curva número, utilizando a precipitação total de um dia para estimar o escoamento superficial. Essa relação exclui a duração e a intensidade da chuva.

Quando a irrigação é aplicada, o modelo assume não ocorrer escoamento superficial. O usuário deve fornecer um número da curva para condições médias de precipitação. A partir desse valor, as curvas de alto e baixo escoamento são calculadas. O modelo usa as curvas entre esses dois extremos para calcular o escoamento superficial em função da umidade do solo. O cálculo da evaporação atual do solo é baseado em dois estágios, um constante e outro com queda de velocidade. No primeiro estágio, a evaporação da superfície do solo é limitada pelo parâmetro U. No momento que a evaporação atinge o valor do limite máximo (parâmetro U), a evaporação decresce proporcionalmente ao tempo gasto no segundo estágio. Maiores detalhes são descritos por Ritchie (1992).

O perfil do solo é compartimentado em diferentes camadas, nas quais são determinadas as umidades de *saturação*, *capacidade de campo* e *ponto de murcha permanente*. Quando o teor de água de uma camada está acima da *capacidade de campo* (θ_{cc} , $m^3.m^{-3}$), uma fração de água migra para a camada inferior mais próxima (efeito cascata). Para conteúdos de água abaixo da *capacidade de campo*, o movimento torna-se dependente do gradiente do conteúdo de água e da difusividade entre as duas camadas. A difusividade é obtida em função de dois parâmetros definidos pelo usuário (*diffus_const* e *diffus_slope*) no conjunto de parâmetros do modelo (APSIM, 2009). Fluxos insaturados podem mover-se tanto no sentido de camadas superiores, quanto para camadas inferiores.

Por meio do balanço hídrico simulado nas diferentes camadas, o modelo determina a tensão da água no solo. Em função dessa tensão, são determinados os fatores de estresse hídrico que são considerados nos cálculos diários de assimilação de CO_2 . A tensão de água no solo é obtida por meio da interpolação logarítmica a partir dos valores fornecidos da *saturação*, *capacidade de campo* e *ponto de murcha permanente* das diferentes camadas (BOUMAN et al., 2001).

3.3 Dinâmica do nitrogênio no modelo ORYZA-APSIM

A dinâmica do nitrogênio calcula a demanda, absorção, distribuição e translocação do nitrogênio no dossel e também computa os fatores de estresse do crescimento e desenvolvimento causados pela limitação de nitrogênio (ALVAREZ et al., 2006).

O modelo calcula a demanda potencial diária de nitrogênio dos vários órgãos da cultura baseados nos seus pesos, taxas de crescimentos e seus conteúdos máximos e mínimos de nitrogênio e posteriormente computa a quantidade de nitrogênio que pode ser translocada

diariamente das folhas, colmos, e raízes para os órgãos de armazenagem. A quantidade diária de nitrogênio translocável é subtraída da demanda potencial diária do nitrogênio absorvido do solo. A quantidade de nitrogênio absorvida é distribuída entre os diferentes órgãos da planta com base nas suas demandas relativas. O fluxo total de nitrogênio (absorção do solo e translocação) é integrado na quantidade total de nitrogênio nos órgãos e planta inteira. São calculados fatores de estresse de nitrogênio para o crescimento e desenvolvimento da cultura. Quando a cultura é considerada bem suprida com nitrogênio, o modelo é rodado sem limitações de nitrogênio. Então, na simulação do balanço de nitrogênio os valores dos fatores de estresse causados pela falta de nitrogênio são considerados 1 (sem estresse) e a cultura não sofre limitações de crescimento e desenvolvimento devido a falta de nitrogênio (ALVAREZ et al., 2006). No caso da cultura não ser considerada bem suprida com nitrogênio, o modelo calcula os valores dos fatores de estresse de nitrogênio, que são utilizados nos cálculos da taxa de morte foliar e eficiência fotossintética (BOMAN et al., 2001).

3.4 Esquema seqüencial de cálculos do modelo ORYZA-APSIM

O modelo apresenta a seguinte seqüência de cálculos: (i) realização do balanço hídrico e determinação das taxas de evaporação potencial do solo e transpiração potencial da cultura; (ii) cálculo da transpiração atual, das taxas de absorção de água pela cultura (função das taxas de transpiração potencial), tensão da água no solo na região das raízes e o cálculo dos fatores de estresse hídrico presente ou não nesse período; (iii) cálculo da demanda potencial e a absorção atual de nitrogênio da cultura, da distribuição e translocação do nitrogênio no dossel e dos efeitos dos fatores de estresse de limitações de nitrogênio no crescimento e desenvolvimento da cultura; e (iv) cálculo do crescimento e desenvolvimento do arroz em função de dados climáticos, características da cultura e parâmetros de gerenciamento, levando em conta fatores de estresse hídrico ou não e os efeitos de limitações pela disponibilidade de nitrogênio.

3.5 Variáveis de entrada do modelo ORYZA-APSIM

As variáveis de entrada do modelo podem ser divididas em dois grupos: Variáveis meteorológicas e de Solo. Essas variáveis estão ilustradas na Tabela 4.

Tabela 4 - Variáveis de entrada do modelo ORYZA-APSIM

Parâmetros	Unidade
Elementos do clima	
Radiação global diária	MJ.m ⁻² .d ⁻¹
Temperatura máxima diária	°C
Temperatura mínima diária	°C
Precipitação diária	mm.d ⁻¹
Latitude	graus
Solo	
Número de camadas do solo	-
Espessuras das camadas do solo	m
Reflexão da superfície (albedo)	-
Massa específica do solo	g.cm ⁻³
Teor de água do solo na <i>capacidade de campo</i>	mm
Teor de água do solo saturado	mm
Teor de água do solo no <i>ponto de murcha permanente</i>	mm

3.6 Dados experimentais

Para a obtenção dos dados deste trabalho foram conduzidos dois experimentos entre novembro de 2008 e abril de 2009 na fazenda capivara, área experimental da EMBRAPA *Arroz e Feijão* (CNPAF), localizada as margens da rodovia GO 462, km 12, no Município de Santo Antônio de Goiás-GO. As coordenadas geográficas do local são: Latitude: 16°29'46.7''S, Longitude: 49°17'41,5''W e Altitude: 741 metros (HEINEMANN et al., 2007).

O solo local é classificado como Latossolo Vermelho Eutroférico. As características químicas são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Análise química do solo (pH em água), teores de cálcio (Ca), magnésio (Mg), alumínio (Al) e hidrogênio e alumínio (H+Al) ($\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$), de fósforo (P), potássio (K), cobre (Cu), zinco (Zn), ferro (Fe) e manganês (Mn) ($\text{mg}.\text{dm}^{-3}$) e matéria orgânica (MO, $\text{g}.\text{dm}^{-3}$)

pH	Ca	Mg	Al	H+Al	P	K	Cu	Zn	Fe	Mn	MO
		$\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$					$\text{mg}.\text{dm}^{-3}$				$\text{g}.\text{dm}^{-3}$
5,4	1,62	0,5	0,1	4,85	3,5	126	2,9	1,5	64	34	20

Foi utilizada a variedade cultivada de terras altas BRS-Primavera. A adubação consistiu em $400 \text{ kg}.\text{ha}^{-1}$ do formulado (5-30-15) como adubação de base, e $45 \text{ kg}.\text{ha}^{-1}$ de nitrogênio, aplicados como cobertura duas semanas antes da iniciação da panícula. A semeadura foi feita com 90 sementes por metro linear, com um espaçamento entre linhas de 0,2 m, proporcionando uma densidade aproximada de 270 plantas por m^2 .

Foi utilizado o delineamento de blocos casualizados com quatro repetições. Foram anotadas as datas da emergência, iniciação da panícula, florescimento e maturação fisiológica. Em cada uma dessas datas foi determinado a massa seca das folhas (MS_f , $\text{kg}.\text{planta}^{-1}$) e colmos (MS_c , $\text{kg}.\text{planta}^{-1}$). Nas datas do florescimento e maturação fisiológica também foram determinadas a massa de matéria seca das panículas.

Da emergência até a iniciação da panícula avaliou-se a emissão de folhas. A área foliar (AF , $\text{m}^2.\text{planta}^{-1}$), o índice de área foliar (IAF , $\text{m}^2.\text{m}^{-2}$ - m^2 de folha por m^2 de solo) e área foliar específica ($AFE=AF/MS_f$) foram avaliadas durante todo o crescimento.

Na maturação fisiológica foi determinado o número de grãos por panícula, números de grãos vazios por metro, número de grãos por metro, número de panículas por metro quadrado, peso de 1000 sementes (g), percentual de esterilidade de panículas (%), umidade do grão, produtividade ($\text{kg}.\text{ha}^{-1}$) e a distribuição do sistema radicular no perfil do solo (%).

O teor de água do solo foi avaliado em 10 camadas, com 0,1 m de profundidade cada. Foram determinadas as umidades de saturação (mm), capacidade de campo (mm), ponto de murcha permanente (mm) e a densidade do solo ($\text{g}.\text{cm}^{-3}$) para cada uma dessas camadas. Os dados meteorológicos diários das temperaturas máximas e mínimas ($^{\circ}\text{C}$), precipitação (mm) e radiação global ($\text{MJ}.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) foram coletados na estação meteorológica da EMBRAPA Arroz e Feijão, localizada no local do experimentos.

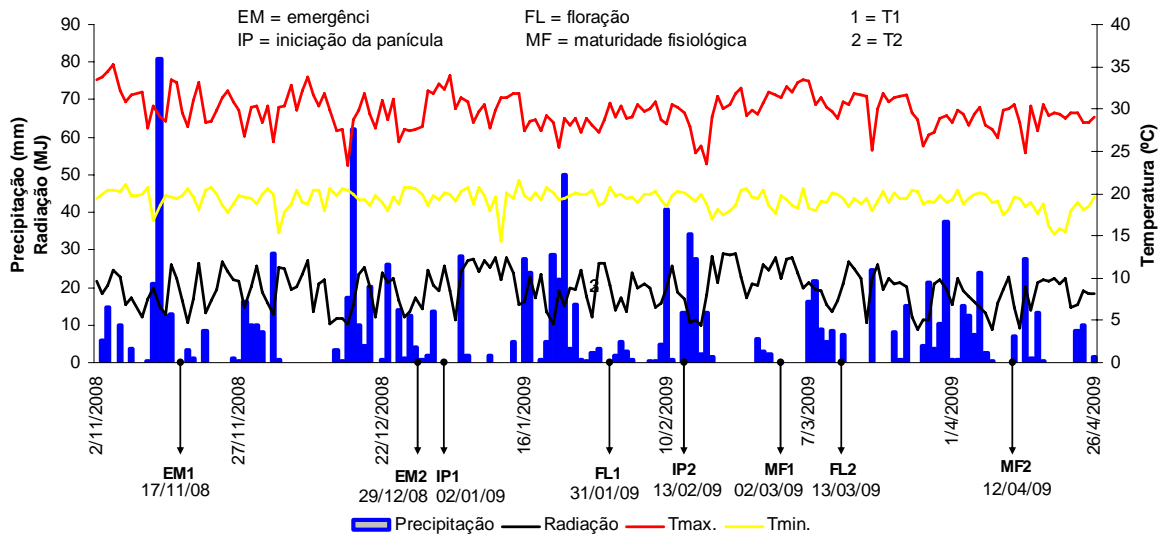


Figura 3 - Dados climáticos observados durante ciclo da cultura de arroz de terras altas na safra 2008/2009

3.7 Calibração do modelo ORYZA-APSIM

O modelo ORYZA-APSIM foi calibrado utilizando-se dados da variedade cultivada de arroz de terras altas BRS-Primavera, de acordo com procedimentos descritos em (BOUMAN et al., 2001). Para a calibração do modelo, foram utilizados dados de dois experimentos de valor de cultivo realizados pela *EMBRAPA Arroz e Feijão* em Santo Antônio de Goiás-GO durante a safra 2008/2009.

3.7.1 Calibração do desenvolvimento fenológico da variedade cultivada de arroz de terras altas BRS-Primavera no modelo ORYZA-APSIM

O modelo foi calibrado para simular o desenvolvimento fenológico (duração das fases 1 e 2) em dezessete experimentos realizados em quatro localidades. Esses experimentos foram conduzidos em: (i) Santo Antônio de Goiás-GO (11 experimentos) (Latitude de 16° Sul) nas safras 2004/2005 (2 experimentos), 2005/2006 (2 experimentos), 2006/2007 (1 experimento), 2007/2008 (2 experimentos) e 2008/2009 (4 experimentos), (ii) Sorriso-MT (Latitude de 13° Sul) na safra 2006/2007 (1 experimento), (iii) Gurupi-TO (2 experimentos) (Latitude de 12° Sul) nas safras 2007/2008 (1 experimento) e 2008/2009 (1 experimento) e (iv) Teresina-PI (3 experimentos) (Latitude de 5° Sul) nas safras 2006/2007 (1 experimento), 2007/2008 (1 experimento) e 2008/2009 (1 experimento).

O desenvolvimento fenológico da variedade cultivada BRS-Primavera foi calibrado no modelo utilizando-se dados de dois experimentos (duas datas de emergência; 17/11/2008 e 29/12/2008) de valor de cultivo realizados pela EMBRAPA *Arroz e Feijão* na safra 2008/2009.

O modelo ORYZA-APSIM considera a temperatura e o fotoperíodo nos cálculos do desenvolvimento fenológico. A temperatura e o fotoperíodo são os principais determinantes no desenvolvimento fenológico da cultura (STRECK et al., 2006). Temperatura é uma variável importante no desenvolvimento fenológico da cultura (VAN KEULEN, PENNING DE VRIES; DREES, 1992; GAO et al., 1992), mas em variedades fotossensíveis, o comprimento do dia (fotoperíodo) é quem determina a indução do florescimento (BOUMAN et al., 2001; BAKER et al., 1990; FUKAI, 1999).

Gao et al. (1992) e Summerfield et al. (1992) afirmam que quantificar a resposta fotoperiódica dos genótipos é muito importante em modelos de simulação de desenvolvimento, os quais devem levar em conta os principais fatores ambientais que afetam o desenvolvimento da cultura. A sensibilidade fotoperiódica do genótipo foi quantificada para se determinar o desenvolvimento fenológico da cultura.

Para realizar a quantificação da sensibilidade fotoperiódica da variedade cultivada, foram utilizados dados de dez experimentos de valores de cultivo, realizados pela EMBRAPA *Arroz e Feijão* no município de Santo Antônio de Goiás-GO entre os anos de 2004 a 2009. A sensibilidade fotoperiódica foi quantificada de acordo com a metodologia descrita por Fukai (1999). A sensibilidade fotoperiódica foi determinada por meio de uma regressão linear do número de dias observados nas fases 1 e 2 do desenvolvimento fenológico, plotados em função de suas respectivas datas de semeadura. O valor do coeficiente angular da regressão foi utilizado para determinar a sensibilidade da variedade cultivada (Figura 11). O valor do coeficiente angular determinado para a variedade cultivada BRS-Primavera foi comparado com valores estabelecidos por Fukai (1999).

Foram determinadas as unidades de calor efetivo diário HU ($^{\circ}\text{C dia dia}^{-1}$) e as taxas de desenvolvimento de cada um dos seus respectivos estádios fenológicos (DVR).

As unidades de calor efetivo HUH ($^{\circ}\text{C.d.h}^{-1}$) foram determinadas em função das temperaturas cardinais fixadas pelo modelo ($T_b = 8^{\circ}\text{C}$; $T_o = 30^{\circ}\text{C}$; $T_M = 42^{\circ}\text{C}$) e pela temperatura horária, obtida pela equação (1).

$$T_d = \frac{T_m + T_M}{2} + \frac{(T_M - T_m)}{2} \cos[0,2618(h-14)] \quad (1)$$

em que h é o período do dia.

$$HUH = 0 \text{ (se } T_d \leq T_b \text{ ou } T_d \geq T_M) \quad (2)$$

$$HUH = \frac{T_d - T_b}{24} \text{ (se } T_b < T_d < T_M) \quad (3)$$

$$HUH = \frac{1}{24} \left[T_o - (T_d - T_o) \frac{T_o - T_b}{T_H - T_o} - T_b \right] \text{ (se } T_o < T_d < T_M) \quad (4)$$

O *DVR* foi determinado de acordo com Kropff et al. (1994), baseado nas taxas constantes dos estádios fenológicos e suas unidades de calor efetivo diário (*HU*; °C.dia.dia⁻¹) ocorridas no estádio.

HU (°Cd d⁻¹) foi obtido pela seguinte equação:

$$HU = \sum_{h=1}^{24} HUH_h \quad (5)$$

Então o *DVR* e o *DVS* são obtidos pelas seguintes equações:

$$DVR = \frac{DVS}{HU} \text{ (ou } DVS = DVR.HU) \quad (6)$$

Tabela 6 - Valores das variáveis utilizadas na calibração do modelo para as duas datas de emergência dos experimentos

Data da emergência	<i>DAE</i> ¹ (dia)	<i>HUH</i> ¹ (°C.d.h ⁻¹)	<i>DVR</i> ¹ (°C.dia ⁻¹)
<i>DVS</i> ¹ (0 a 0,65) (fase 1)			
17/11/08	0-46	750	0,000869
29/12/08	0-46	748	0,000864
Média	46*	749*	0,000867*
<i>DVS</i> (0,65 a 1) (fase 2)			
17/11/08	46-75	461	0,000744
29/12/08	46-74	470	0,000744
Média	46-75*	465*	0,000744*
<i>DVS</i> (1 a 2) (fase 3)			
17/11/08	75-105	460	0,002284
29/12/08	74-104	438	0,002064
Média	75-105*	449*	0,002174*

¹ *DAE*: dias após a emergência (dia), *HUH*: unidades de calor efetivo (°C.d.h⁻¹), *DVS*: estádio de desenvolvimento e *DVR*: taxa de desenvolvimento (°C.dia⁻¹), * valor médio utilizado na calibração do modelo

Para minimizar o efeito de possíveis erros experimentais, foram utilizados os valores médios dos dados observados nos dois experimentos. O número de dias, o somatório das unidades de calor efetivo (*HUH*) e as taxas de desenvolvimento (*DVR*) de cada uma das fases da cultura utilizadas na calibração do modelo são apresentados na Tabela 6.

3.7.2 Calibração do crescimento da variedade cultivada de arroz de terras altas BRS-Primavera no modelo ORYZA-APSIM

Foram realizadas calibrações do modelo ORYZA-APSIM para a determinação da massa de matéria seca da parte aérea (*MST*; kg.ha⁻¹) e de folhas verdes (*MSF*; kg.ha⁻¹), índice de área foliar (*IAF*; m².m⁻²) e produtividade (*P*; kg.ha⁻¹) da variedade cultivada BRS-Primavera, em dois experimentos (duas datas de semeadura) em Santo Antônio de Goiás-GO (EMBRAPA *Arroz e Feijão*) na safra 2008/2009.

Foram calibradas as curvas de partição de assimilados para folhas, colmos, órgãos de armazenagem e índice de área foliar.

3.7.2.1 Partição de assimilados

A partição de assimilados foi determinada em função da fração da massa de matéria seca dos órgãos contidos na biomassa seca total da parte aérea observada nos experimentos. As frações da massa de matéria seca dos órgãos na biomassa seca total da parte aérea foram assim calculadas:

$$FLV = \frac{\Psi_{t_2} - \Psi_{t_1}}{\Omega_{t_2} - \Omega_{t_1}} \quad (7)$$

$$FST = \frac{\Upsilon_{t_2} - \Upsilon_{t_1}}{\Omega_{t_2} - \Omega_{t_1}} \quad (8)$$

$$FSO = \frac{\chi_{t_2} - \chi_{t_1}}{\Omega_{t_2} - \Omega_{t_1}} \quad (9)$$

em que *FLV*, *FST* e *FSO* se referem, respectivamente às frações (kg.kg⁻¹) da massa de matéria seca da parte aérea alocada para folhas, colmos e órgãos de armazenagem; Ψ , χ e Ω se referem, respectivamente, à massa (kg) da folha, da panícula e da parte aérea nos instantes t_1 e t_2 (instantes iniciais e finais referentes ao início e fim do período de avaliação).

A fração da massa de matéria seca de colmos de reserva (*FSTR*, kg.kg⁻¹) é assim calculada:

$$FSTR = \frac{\beta - \delta}{\beta} \quad (10)$$

em que β se refere à massa máxima do colmo (kg) no florescimento e δ à massa do colmo (kg) na colheita.

Tabela 7 - Valores observados das frações (kg.kg^{-1}) da massa de matéria seca dos órgãos (*FLV*: folhas, *FST*: colmos, e *FLO*: órgãos de armazenagem) em diferentes estádios de desenvolvimento (*DVS*) utilizados na calibração do modelo

<i>DVS</i>	<i>FLV</i>	<i>FST</i>	<i>FSO</i>
0,13	0,59	0,41	0,00
0,26	0,57	0,43	0,00
0,36	0,59	0,41	0,00
0,44	0,50	0,50	0,00
0,70	0,45	0,55	0,00
0,72	0,48	0,52	0,00
0,74	0,41	0,59	0,00
0,92	0,35	0,61	0,05
1,02	0,31	0,57	0,11
1,28	0,32	0,52	0,17

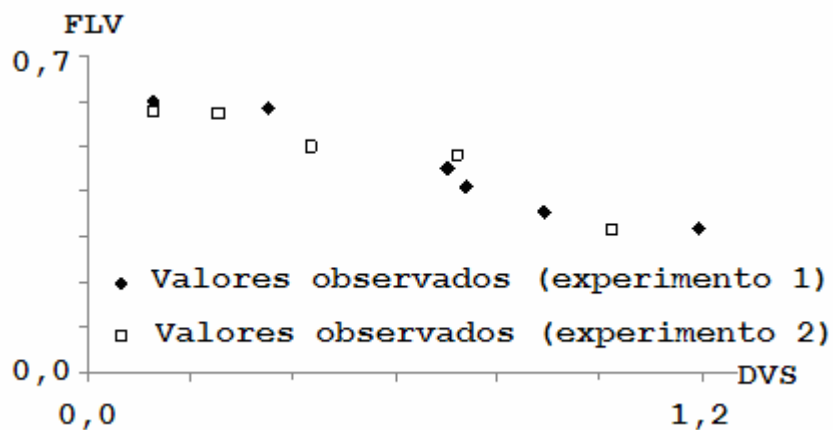


Figura 4 - Valores observados da partição de assimilados para as folhas (*FLV*, kg.kg^{-1}) em diferentes estádios de desenvolvimento da variedade cultivada de terras altas BRS-Primavera

Os valores observados das frações (kg.kg^{-1}) da *FSL*, *FST* e *FSO* em diferentes estádios de desenvolvimento da cultura nos dois experimentos são apresentados na Tabela 7.

Em função dos valores observados, foram obtidas relações entre e a biomassa seca dos órgãos e a biomassa seca total da parte aérea em diferentes estádios de desenvolvimento. Essas relações são demonstradas nas Figuras 4, 5 e 6.

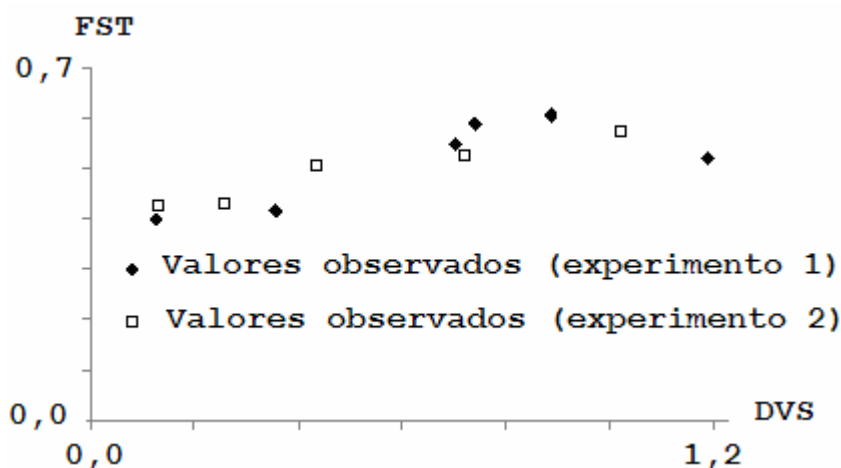


Figura 5 - Valores observados da partição de assimilados para colmos (*FST*, kg.kg^{-1}) em diferentes estádios de desenvolvimento da variedade cultivada de terras altas BRS-Primavera

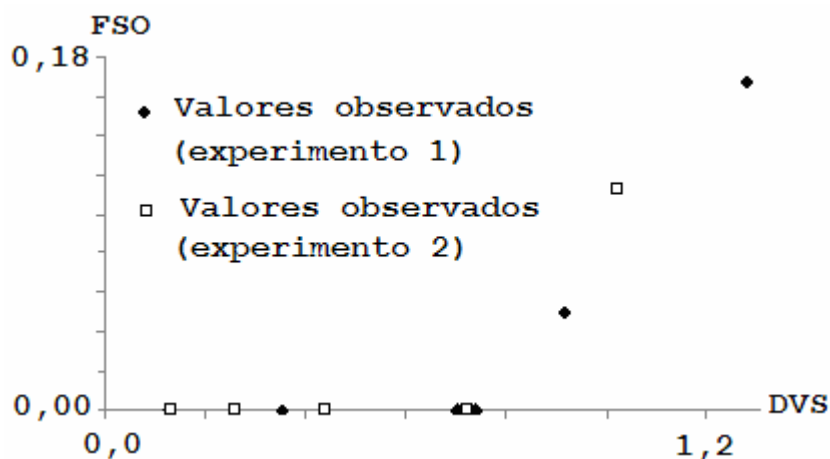


Figura 6 - Valores observados da partição de assimilados para os órgãos de armazenagem (*FSO*, kg.kg^{-1}) em diferentes estádios de desenvolvimento da variedade cultivada de terras altas BRS-Primavera

As curvas de partição de assimilados utilizadas na calibração do modelo foram determinadas e função das frações da biomassa seca dos órgãos e biomassa seca total da parte aérea observada nos diferentes estádios de desenvolvimento da cultura. Frações da massa de

matéria seca dos órgãos em estádios de desenvolvimento intermediários aos observados nos experimentos foram utilizadas na construção das curvas. Essas frações foram obtidas por interpolações dos valores observados nos diferentes estádios de desenvolvimento da cultura. Comparações entre a curva padrão do genótipo de arroz irrigado (variedade cultivada IR-72) e a curva determinada para a variedade cultivada de arroz de terras altas BRS-Primavera são apresentadas nas Figuras 7, 8 e 9.

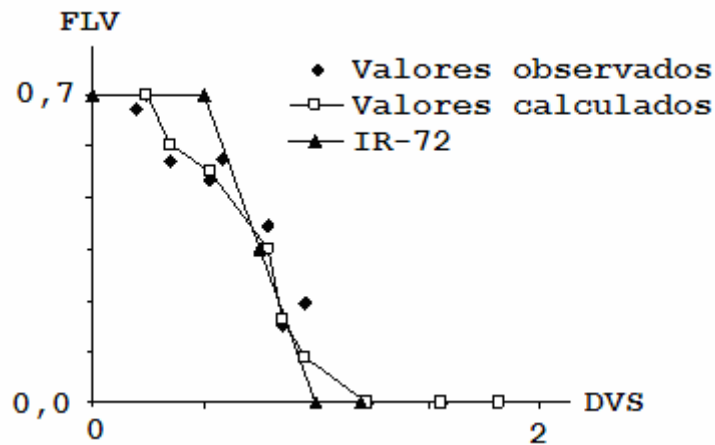


Figura 7 - Curvas de partição de assimilados para as folhas (FLV , kg.kg^{-1}) da variedade cultivada irrigada IR-72 e de terras altas BRS-Primavera

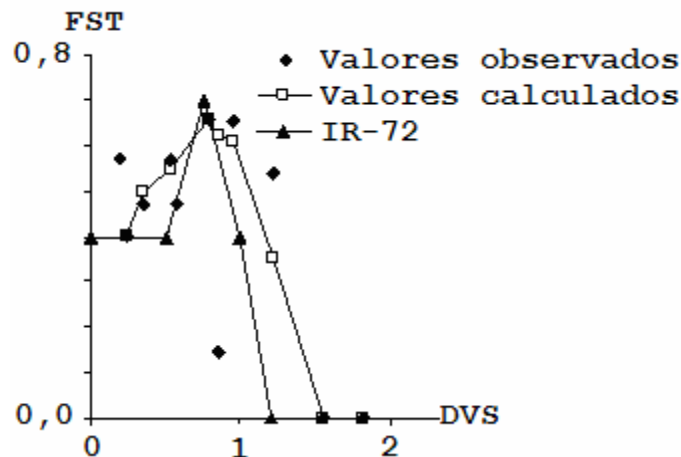


Figura 8 - Curvas de partição de assimilados para os colmos (FST , kg.kg^{-1}) da variedade cultivada irrigada IR-72 e da variedade cultivada de terras altas BRS-Primavera

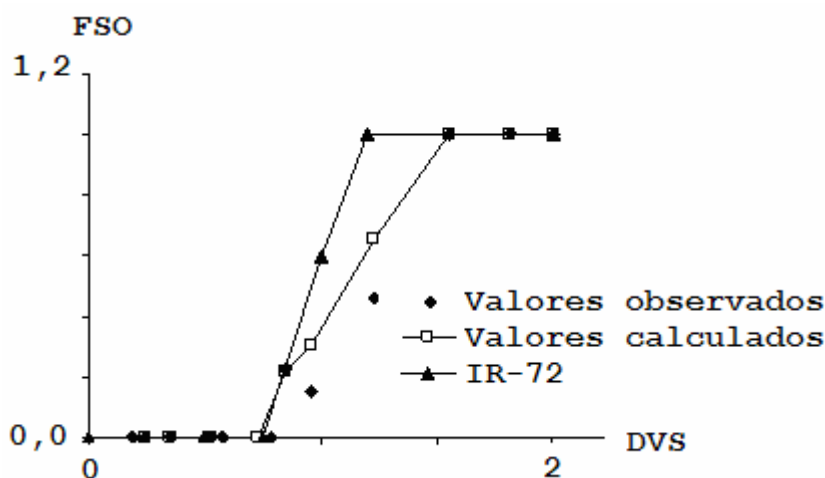


Figura 9 - Curvas de partição de assimilados para os órgãos de armazenagem (FSO , kg.kg^{-1}) da variedade cultivada irrigada IR-72 e da variedade cultivada de terras altas BRS-Primavera

3.7.2.2 Índice de área foliar

O crescimento foliar é dividido em duas fases. A primeira fase do crescimento foliar, quando (Índice de área foliar igual ou inferior a 1), é caracterizada pelo crescimento exponencial do IAF em função da soma térmica ocorrida no período. A segunda fase do crescimento foliar, quando (Índice de área foliar superior a 1), é caracterizada pelo crescimento linear do IAF em função da área foliar específica (AFE , ha.kg^{-1}).

Na fase inicial do crescimento foliar (exponencial), o IAF foi calculado em função da soma térmica e da taxa de crescimento relativo da área foliar ($RGRL$, $(^{\circ}\text{C.dia})^{-1}$). O cálculo do IAF é efetuado utilizando a seguinte equação:

$$IAF_{t_s} = IAF_{t_0} \cdot e^{RGRL \cdot t_s} \quad (11)$$

em que IAF_{t_s} se refere ao índice de área foliar ($\text{m}^2.\text{m}^{-2}$) em uma soma de temperatura específica após a emergência t_s ($^{\circ}\text{C.dia}$) e IAF_{t_0} ao índice de área foliar ($\text{m}^2.\text{m}^{-2}$) na soma de temperatura zero (t_0 , $^{\circ}\text{C.dia}$).

A $RGRL$ é estimada a partir da inclinação da relação entre $\ln(IAF)$ e a soma das unidades de calor efetivo diário (HU , $^{\circ}\text{C.dia.dia}^{-1}$):

$$RGRL = \frac{\ln(IAF_{t_2}) - \ln(IAF_{t_1})}{HU} \quad (12)$$

em que IAF_{t_2} é o índice de área foliar na soma de temperatura final da fase exponencial e IAF_{t_1} é o índice de área foliar na soma da temperatura no início da fase exponencial.

O rápido crescimento da área foliar do genótipo de terras altas durante a fase exponencial impossibilitou a coleta de dados do IAF . Devido à falta de dados, o valor da $RGRL$ foi obtido por meio de simulações, nas quais foram testados diferentes valores até se obter um valor adequado.

Primeiramente foi realizada uma simulação utilizando-se o valor padrão da $RGRL$, estabelecido no modelo. A simulação com esse valor de $RGRL$ não possibilitou o ajuste do crescimento da área foliar. Então foram realizadas outras simulações onde o valor do $RGRL$ foi sendo ajustado pelo método de tentativa e erro, até que fosse encontrado um valor que permiti-se o ajuste da curva simulada com os valores observados. O valor do $RGRL$ utilizado no ajuste do modelo é especificado na Tabela 8.

Na segunda fase do crescimento foliar (linear), a taxa de crescimento da área foliar foi obtida em função da área foliar específica. A área foliar específica (AFE , ha folha por kg de folha) foi obtida pela equação:

$$AFE = A + Be^{C(DVS-D)} \quad (13)$$

em que A , B , C e D são parâmetros da função. Esses parâmetros determinam o formato e o patamar da curva.

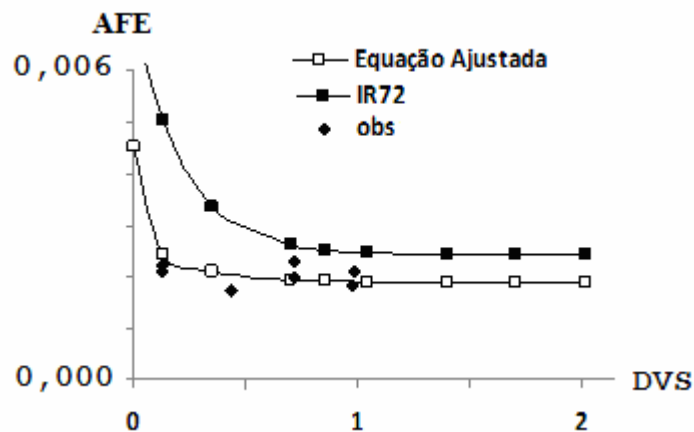


Figura 10 - Curva da área foliar específica (AFE , ha.kg⁻¹ - ha de folha por kg de folha) ajustada pelos parâmetros A e B em função dos valores observados

Para a calibração do IAF no modelo, foram determinados valores para os parâmetros A e B . Já para os parâmetros C e D , foram utilizados os valores padrão estabelecidos no modelo. Os valores dos parâmetros A e B , foram determinados por meio de simulações, onde foram utilizados

diferentes valores para esses parâmetros (tentativa e erro), até se obter um ajuste aproximado da curva do *AFE* com os valores observados. A curva ajustada para a calibração do modelo é apresentada na Figura 10.

Os valores dos parâmetros empíricos referentes à estimativa da área foliar específica, da fração da massa de matéria seca de colmos de reserva e da taxa de crescimento relativo da área foliar utilizados na calibração do modelo são demonstrados na Tabela 8.

Tabela 8 - Parâmetros (*A*, *B*, *C* e *D*) empíricos referentes à estimativa da área foliar específica, fração da massa de matéria seca de colmos de reserva (*FSTR*, kg.kg⁻¹) e taxa de crescimento relativo da área foliar (*RGRL*, (°C.dia)⁻¹)

Dados da	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>FSTR</i>	<i>RGRL</i>
calibração	ha.kg ⁻¹	ha.kg ⁻¹	-	-	kg.kg ⁻¹	(°C.dia) ⁻¹
Valores	0,0019	0,0005	-4,5**	0,14**	0,171	0,02*

* valor obtido através de ajuste no modelo em função dos dados observados no campo

** valores da variedade cultivada padrão (IR-72) estabelecidos no modelo

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Determinação da sensibilidade fotoperiódica da variedade cultivada de terras altas BRS-Primavera

A sensibilidade fotoperiódica da variedade cultivada BRS-Primavera foi quantificada pelo valor do coeficiente angular de uma regressão linear estabelecida entre o número de dias compreendidos entre a emergência e a floração, em função de suas respectivas datas de semeadura. De acordo com Fukai (1999), quanto maior o coeficiente angular maior é a sensibilidade fotoperiódica da variedade cultivada. Streck et al. (2006) afirma que essa relação é apropriada para regiões tropicais, onde a temperatura do ar não é limitante para o crescimento e desenvolvimento do arroz.

A caracterização fotoperiódica é observada na regressão linear da Figura 11.

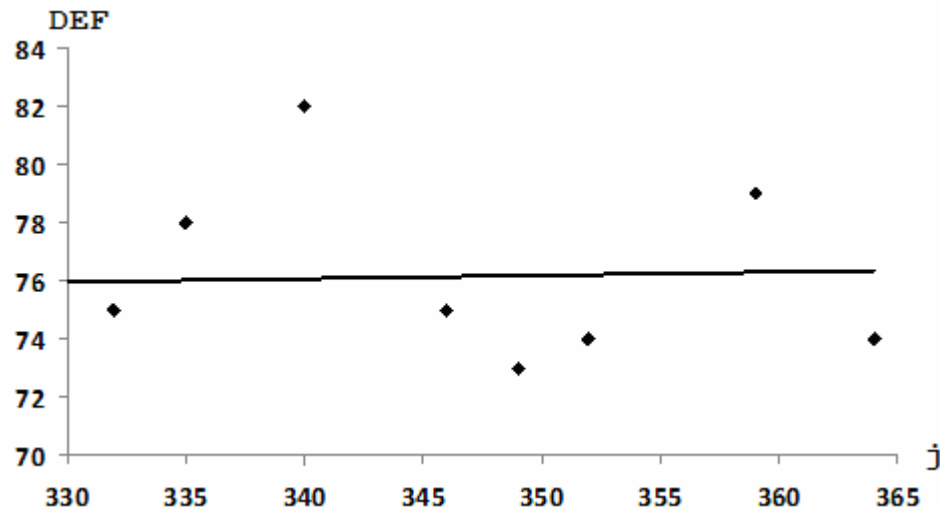


Figura 11 - Regressão linear para a caracterização da sensibilidade fotoperiódica da variedade cultivada de arroz de terras altas BRS-Primavera ($DEF=0,0115.j + 72,136$; $R^2 = 0,1691$ - DEF: dias entre emergência e florescimento e j: número de ordem do dia do ano)

Fukai (1999) dividiu a sensibilidade fotoperiódica em função dos coeficientes angulares em quatro níveis: (nível 1) insensível (0 - 0,3), (nível 2) mediamente sensível (0,3 - 0,7), (nível 3) altamente sensível (0,7 - 0,8) e (nível 4) extremamente sensível (0,8 - 0,9).

O valor do coeficiente angular da regressão obtido para a variedade cultivada BRS-Primavera foi de 0,0115, caracterizando sua insensibilidade fotoperiódica.

Bueno et al. (1981) mencionam que as variedades cultivadas que são geralmente utilizadas na região central do Brasil são insensíveis ao fotoperíodo. Steinmetz e Meireles (1999), ao observarem a época de semeadura recomendada na maioria das regiões produtoras de arroz de terras altas, determinaram que o fotoperíodo não é um fator limitante ao desenvolvimento das plantas, uma vez que as variedades cultivadas são melhoradas e selecionadas para compatibilizar com o fotoperíodo das regiões.

Devido à insensibilidade fotoperiódica observada na variedade cultivada BRS-Primavera, os estádios básicos do desenvolvimento fenológico considerados para a calibração do modelo foram estabelecidos em: fase vegetativa, da emergência (*DVS* 0) à iniciação da panícula (*DVS* 0,65); fase reprodutiva, da iniciação da panícula (*DVS* 0,65) ao florescimento (*DVS* 1), e fase de enchimento de grãos, da floração (*DVS* 1) à maturidade fisiológica (*DVS* 2). Swain et al. (2007) determinaram que essas fases representam bem o desenvolvimento fenológico do arroz insensível ao fotoperíodo. Um exemplo dessa distribuição é dado na Figura 2.

4.2 Avaliação do desenvolvimento fenológico da variedade cultivada de arroz de terras altas BRS-Primavera no modelo ORYZA-APSIM

A avaliação do desenvolvimento fenológico do modelo foi realizada por comparações entre os números de dias simulados e observados da emergência a floração (fases 1 e 2) em dezessete experimentos realizados em quatro regiões produtoras de arroz de terras altas. As diferenças entre o número de dias simulados e observados para as quatro regiões são apresentadas na Figura 12.

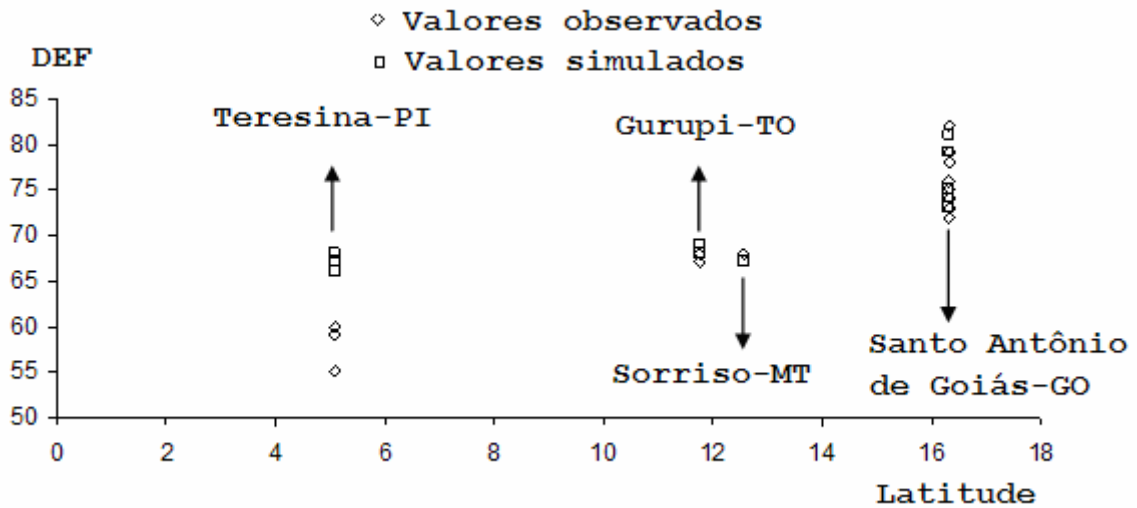


Figura 12 - Avaliação da duração das fases 1 e 2 (emergência ao florescimento). Comparação entre os números de dias simulados e observados entre a emergência e o florescimento (DEF, dia) da variedade cultivada de terras altas BRS-Primavera em Teresina-PI, Gurupi-TO, Sorriso-MT e Santo Antônio de Goiás-GO

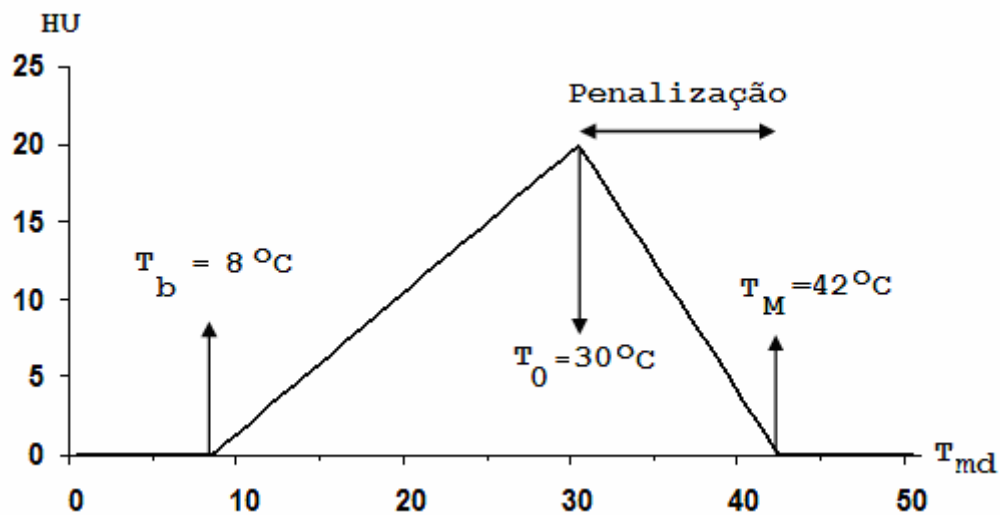


Figura 13 - Unidades de calor efetivo diário (HU , $^\circ\text{C}\cdot\text{dia}\cdot\text{dia}^{-1}$) em função da temperatura média (T_{md} , $^\circ\text{C}$) com temperatura máxima de 42°C (T_M , $^\circ\text{C}$) (T_b : temperatura basal - 8°C , T_0 : temperatura ótima - 30°C) (valores adotados no modelo ORYZA-APSIM)

O modelo apresentou bom desempenho nas simulações do desenvolvimento fenológico para as localidades de maiores latitudes (Santo Antônio de Goiás-GO 16° Sul, Sorriso-MT 13° Sul e Gurupi-TO 12° Sul). Nesses locais os números de dias simulados e observados das fases 1 e

2 foram semelhantes. No entanto, percebe-se que o modelo superestimou o número de dias ocorridos entre a emergência e o florescimento para a região de menor latitude. As maiores diferenças entre os valores simulados e observados ocorreram em Teresina-PI (5° Sul).

O aumento do número de dias das fases 1 e 2 foi ocasionado por penalizações do modelo. O modelo assume um decréscimo linear das unidades de calor efetivo (HUH) quando a T_d atinge valores intermediários entre a T_O e a T_M . A penalização é aumentada à medida que a T_d se aproxima da T_M . A partir do momento em que a T_d se iguala ou ultrapassa a T_M , o HUH é considerado zero e o desenvolvimento fenológico é paralisado. Uma representação gráfica desse comportamento é demonstrada na Figura 13.

Tabela 9 - Valores médios mensais da temperatura máxima (T_M , °C), mínima (T_m , °C) e médias (T_{md} , °C) dos municípios de Santo Antônio de Goiás-GO e Teresina-PI

Mês	Santo Antônio de Goiás,GO			Teresina, PI		
	T_M	T_m	T_{md}	T_M	T_m	T_{md}
Janeiro	29,1	18,5	23,8	32,4	22,7	27,6
Fevereiro	29,7	18,4	24,1	32	22,4	27,2
Março	29,5	18,0	23,8	31,9	22,5	27,2
Abril	28,6	16,3	22,5	32,0	22,8	27,4
Mai	27,0	13,7	20,4	32,2	22,4	27,3
Junho	26,2	11,8	19,0	32,8	21,4	27,1
Julho	26,0	11,5	18,8	33,6	20,7	27,2
Agosto	27,9	12,8	20,4	35,4	20,8	28,1
Setembro	29,0	15,2	22,1	36,5	22,0	29,3
Outubro	29,3	17,1	23,2	37,0	22,9	30,0
Novembro	28,7	17,9	23,3	36,2	23,2	29,7
Dezembro	28,4	18,3	23,4	35,0	23,2	29,1
Média	28,3	15,8	20,1	33,9	22,3	28,2

Fonte: Heinemann et al. (2007)

Tonietto e Mandelli (2003) afirmam que a diminuição da latitude ocasiona o aumento da temperatura média do ar, a qual aumenta à medida que a latitude diminui e se aproxima da linha do equador. Oliveira Neto et al. (2002) encontraram uma boa correlação entre o aumento da

temperatura e a diminuição da latitude para diferentes localidades do Brasil. Alfonsi et al. (1974) avaliaram a temperatura média mensal e anual do Estado de Goiás em função da latitude e encontraram correlação elevada, demonstrando que a variação da temperatura média do ar nesse Estado ocorre, principalmente, em virtude da variação da latitude. Resultados similares foram encontrados por Buriol et al. (1973) para o Estado do Rio Grande do Sul e Buriol et al. (1974) para o Estado de Santa Catarina.

Heinemann et al. (2007) demonstrou as diferenças entre as temperaturas médias nas latitudes de Santo Antônio de Goiás-GO e para Teresina-PI. As temperaturas máximas, mínimas e as médias anuais e mensais dos municípios de Santo Antônio de Goiás-GO e de Teresina-PI podem ser observadas na Tabela 9.

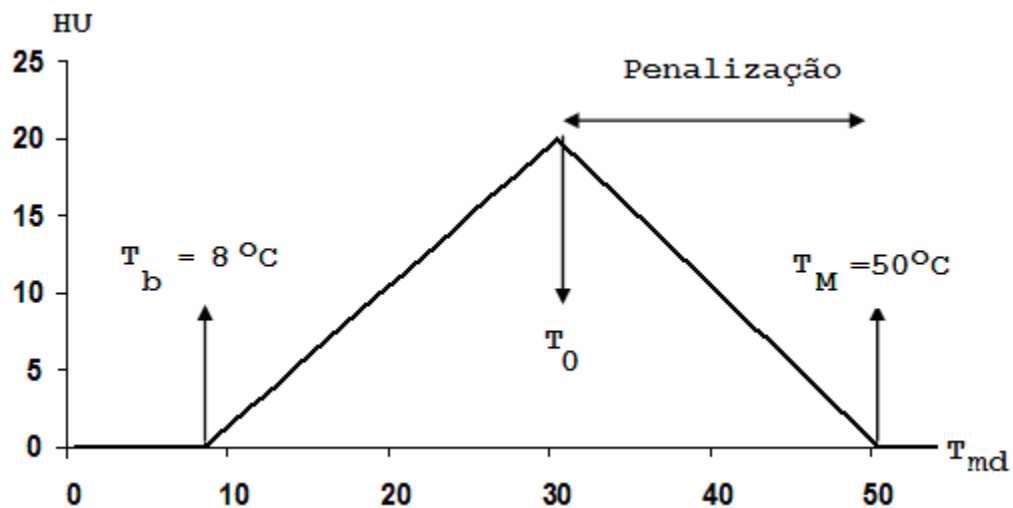


Figura 14 - Unidades de calor efetivo diário (HU , $^{\circ}C \cdot dia \cdot dia^{-1}$) em função da temperatura média (T_{md} , $^{\circ}C$) com elevação da temperatura máxima para $50^{\circ}C$ (T_M , $^{\circ}C$) (T_b : temperatura basal - $8^{\circ}C$, T_0 : temperatura ótima - $30^{\circ}C$)

Na tentativa de verificar um possível ajuste do modelo e minimizar as penalizações, foram criadas duas rotinas (scripts) com auxílio do programa R, nas quais a T_0 foi elevada para $45^{\circ}C$ e T_M elevada para $33^{\circ}C$. Foram realizadas novas simulações com os dados climáticos dos municípios de Santo Antônio de Goiás-GO e Teresina-PI. Nas novas simulações para Teresina-PI, foram utilizados dados climáticos observados nos meses de janeiro, fevereiro, março e abril entre os anos de 2007 e 2009, e para Santo Antônio de Goiás-GO foram utilizados dados climáticos observados nos meses de novembro, dezembro, janeiro fevereiro e março entre os anos de 1983 e 2009.

Na primeira tentativa, a temperatura máxima foi elevada para 50°C, e a ótima foi mantida em 30°C (Figura 14).

As Figuras 15, 16 e 17 ilustram o efeito da elevação da T_M nas simulações do HU .

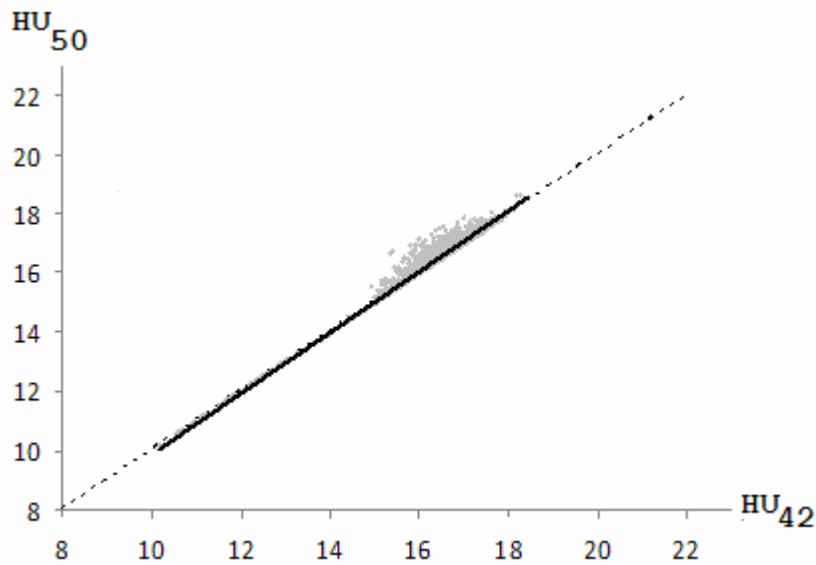


Figura 15 - Influência da elevação da temperatura máxima (T_M , °C) de 42°C nas unidades de calor efetivo diário (HU_{42} , °C.dia.dia⁻¹) das fases 1 e 2 (emergência ao florescimento) para Santo Antônio de Goiás-GO em relação às unidades de calor efetivo diário (HU_{50} , °C.dia.dia⁻¹) para a temperatura máxima (T_M , °C) de 50°C ($HU_{50} = 1,0393.HU_{42} + 0,5411$; $R^2 = 0,9826$)

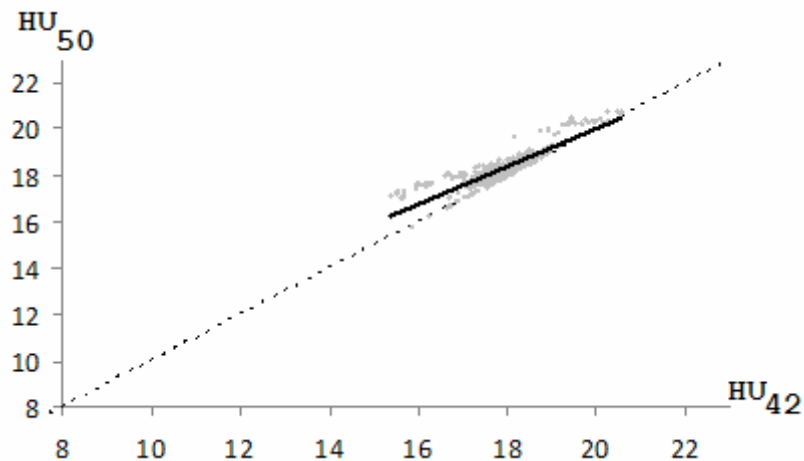


Figura 16 - Influência da elevação da temperatura máxima (T_M , °C) de 42°C nas unidades de calor efetivo diário (HU_{42} , °C.dia.dia⁻¹) das fases 1 e 2 (emergência ao florescimento) para Teresina-PI em relação às unidades de calor efetivo diário (HU_{50} , °C.dia.dia⁻¹) para a temperatura máxima (T_M , °C) de 50°C ($HU_{50} = 0,8108.HU_{42} + 3,7951$; $R^2 = 0,7875$)

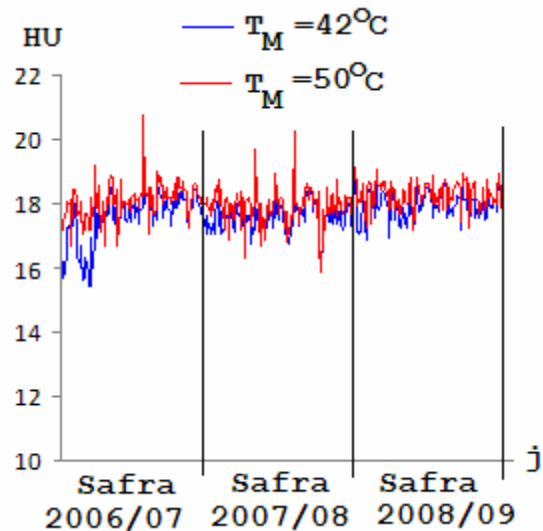


Figura 17 - Comparação do efeito da elevação da temperatura máxima (T_M , °C) de 42°C para 50°C nas unidades de calor efetivo diário (HU , °C.dia.dia⁻¹), em Teresina-PI, para cada dia do ano (j), referente ao período de 1 de janeiro a 30 de abril (safras 2006/2007, 2007/2008 e 2008/2009)

Verificou-se que a simulação com a T_M de 50°C, realizada para o município de Santo Antônio de Goiás-GO não influenciou nas unidades de calor efetivo diário (HU , °C.dia.dia⁻¹) utilizadas na calibração do modelo, não invalidando a calibração realizada (Figura 15).

A simulação com a T_M de 50°C para Teresina-PI influenciou as unidades de calor efetivo diário (HU) (Figura 16). Na região de Teresina-PI, a elevação da T_M para 50 C proporcionou um

aumento do (HU) (Figura 17), resultando numa diminuição média de dois dias nas fases 1 e 2 do desenvolvimento fenológico (Tabela 10). Apesar da diminuição média de dois dias no comprimento dessas fases, os resultados obtidos não foram satisfatórios, pois os números de dias simulados foram de 8 a 11 dias maiores que os observados (Tabela 10). Essa tentativa não proporcionou o ajuste do modelo.

Tabela 10 - Valores observados (*obs*) e simulados (*sim*), para as temperaturas máximas (T_M , °C) de 42 e 50°C, do número de ordem do dia do ano referente à emergência (DE) e ao florescimento (DF), número de dias entre a emergência e o florescimento (DEF , dia) e diferença entre o valor observado e simulado do número de dias entre a emergência e o florescimento (ΔDEF , dia). Teresina-PI

Ano	Valores observados			Valores simulados					
	DE	T_M (42°C)		T_M (50°C)					
		DF_{obs}	DEF_{obs}	DF_{sim}	DEF_{sim}	ΔDEF	DF_{sim}	DEF_{sim}	ΔDEF
2007	37	96	59	104	67	+8	102	65	+6
2008	15	75	60	83	68	+8	82	67	+7
2009	20	75	55	86	66	+11	85	65	+10

Na segunda tentativa, o valor da T_M foi mantido em 42°C e a T_O foi elevada para 33°C (Figura 18). Essa tentativa teve grande influência sobre o número de dias das fases 1 e 2, promovendo uma diminuição satisfatória do comprimento dessas fases em Teresina-PI (Figura 19). Entretanto, ela também influenciou o número de dias das fases 1 e 2 na simulação realizada para Santo Antônio de Goiás-GO (Figura 20). Essa tentativa invalidou a calibração utilizada no modelo. Devido à invalidação da calibração utilizada, a comparação do genótipo em localidades com diferenças de latitudes de igual ou superiores a 10° foi impossibilitada, pois nessas condições, o modelo deverá ser recalibrado para uma nova temperatura ótima sempre que for utilizado em uma região com diferença de latitude igual ou superior a 10° da que calibrado. Nessas condições, a temperatura ótima passa a ser uma variável dependente de local, e não uma variável dependente da espécie. Essa tentativa também não possibilitou a diminuição da penalização e o ajuste do modelo.

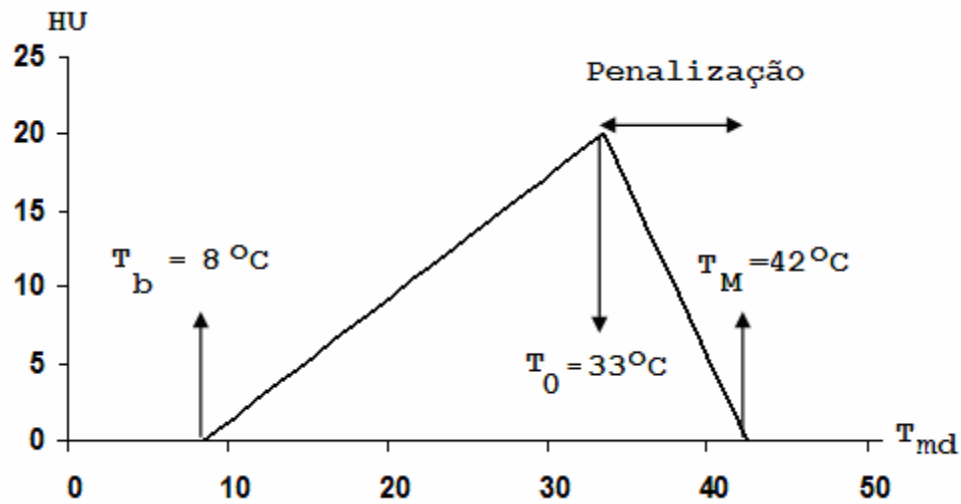


Figura 18 - Unidades de calor efetivo diário (HU , $^\circ\text{C}\cdot\text{dia}\cdot\text{dia}^{-1}$) em função da temperatura média (T_{md} , $^\circ\text{C}$) com a temperatura máxima de 42°C (T_M , $^\circ\text{C}$) (T_b : temperatura basal - 8°C) com a elevação da temperatura ótima (T_0 , $^\circ\text{C}$) para 33°C

Uma forma de melhorar o desempenho do modelo na simulação do número de dias das fases 1 e 2, seria a utilização de cálculos que assumissem um comportamento trapezoidal das unidade de calor efetivo diário em função da temperatura do ar, onde a temperatura ótima se encontraria dentro de uma faixa de variação (Figura 21).

Esse cálculo é usado no modelo CERES-Rice (TINSINA; HUMPHREYS, 2006) e em todos os outros modelos da família CERES. Nesses modelos, o desenvolvimento fenológico é obtido através de aproximações flexíveis que permitem o uso de diferentes formas de equações para as várias fases do desenvolvimento, bem como diferentes temperaturas cardinais (base, ótima e máxima), sendo diferencialmente sensível a temperatura (BOOTE et al., 1998).

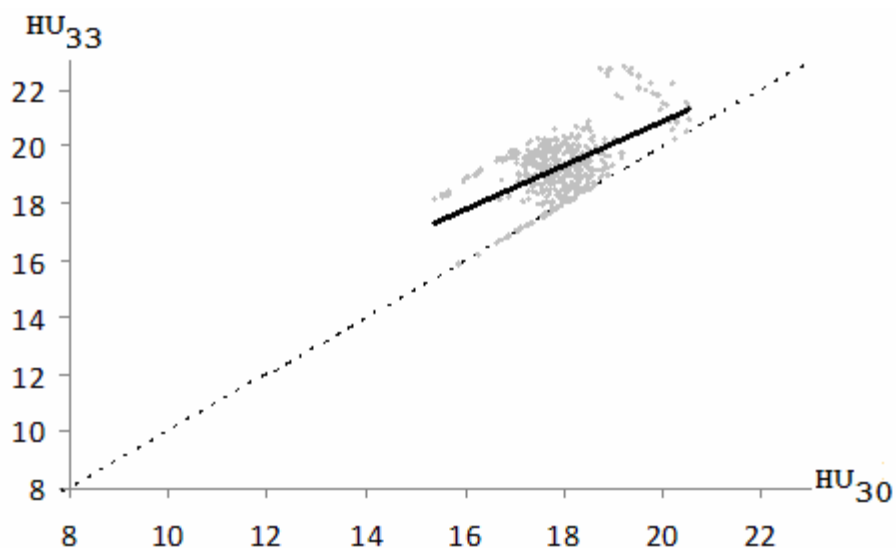


Figura 19 - Influência da temperatura ótima (T_o , °C) de 33°C nas unidades de calor efetivo diário (HU_{33} , °C.dia.dia⁻¹) das fases 1 e 2 (emergência ao florescimento) para Teresina-PI em relação às unidades de calor efetivo diário (HU_{30} , °C.dia.dia⁻¹) utilizando a temperatura ótima (T_o , °C) de 30°C ($HU_{33} = 0,7657.HU_{30} + 5,5541$; $R^2 = 0,297$)

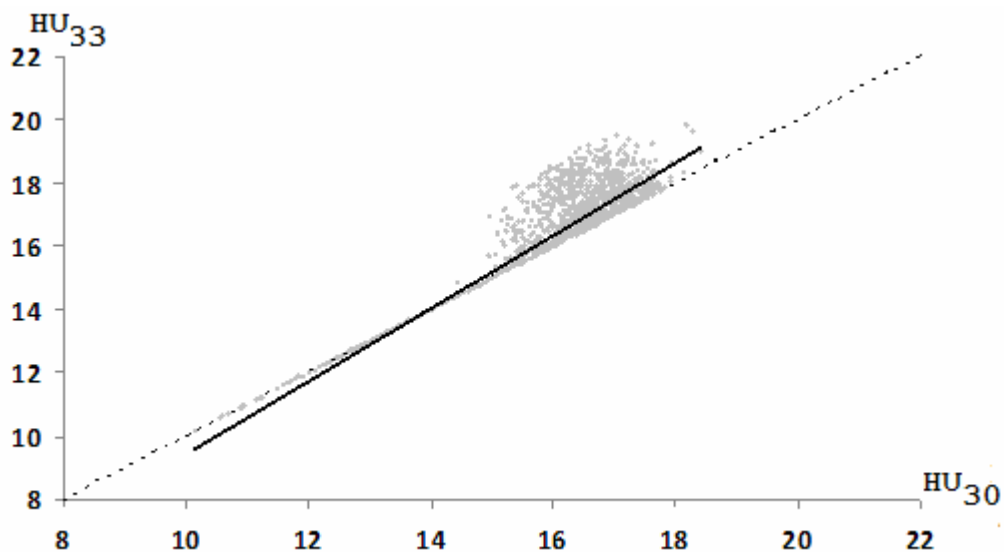


Figura 20 - Influência da temperatura ótima (T_o , °C) de 33°C nas unidades de calor efetivo diário (HU_{33} , °C.dia.dia⁻¹) das fases 1 e 2 (emergência ao florescimento) para Santo Antônio de Goiás-GO em relação às unidades de calor efetivo diário (HU_{30} , °C.dia.dia⁻¹) utilizando a temperatura ótima (T_o , °C) de 30°C ($HU_{33} = 1,147.HU_{30} + 2,0333$; $R^2 = 0,8586$)

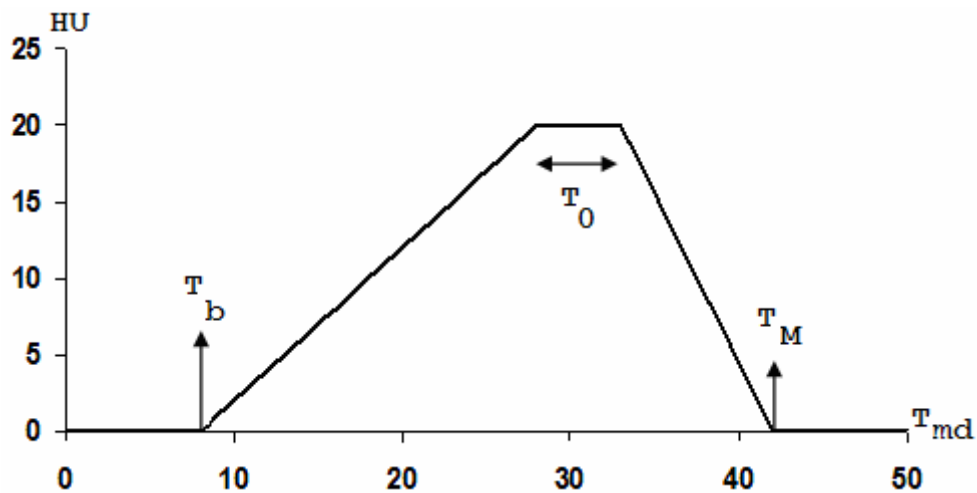


Figura 21 - Unidades de calor efetivo diário (HU , $^{\circ}\text{C}\cdot\text{dia}\cdot\text{dia}^{-1}$) em função da temperatura média (T_{md} , $^{\circ}\text{C}$) (T_b : temperatura basal - 8°C e T_M : temperatura máxima - 42°C) com a adição de uma faixa de variação para a temperatura ótima (T_O , $^{\circ}\text{C}$)

Esse cálculo assume uma faixa de variação para a temperatura ótima (T_O inferior e T_O superior). Mall e Aggarwal (2002) compararam o desempenho dos modelos CERES-Rice e ORYZA-1-N em 11 localidades, do Norte ao Sul da Índia, e observaram que o modelo CERES-Rice apresentou os melhores resultados na simulação do desenvolvimento fenológico do arroz.

Tinsina e Humphreys (2006) relatam que em experimentos de arroz irrigado realizados em diferentes ambientes da Ásia, foram comparados diversos modelos, entre eles o CERES-Rice e ORYZA-1, e os resultados do número de dias das fases 1 e 2, simulados pelo modelo CERES-Rice foram melhores que os simulados pelo ORYZA-1. O modelo ORYZA-1-N e o modelo ORYZA-1 utilizam os mesmos cálculos do ORYZA-APSIM para determinar o desenvolvimento fenológico e as unidades calor efetivo diário (HU).

4.3 Avaliação do crescimento da variedade cultivada de arroz de terras altas BRS-Primavera no modelo ORYZA-APSIM

Na avaliação do crescimento, foram realizadas comparações entre os valores simulados e observados das seguintes variáveis: massa de matéria seca total da parte aérea (MST , $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), massa de matéria seca de folhas verdes (MSF , $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), índice de área foliar (IAF , $\text{m}^2\cdot\text{m}^{-2}$) e produtividade (P , $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$).

A avaliação do crescimento no modelo foi dividida em duas partes. Na primeira parte, foram realizadas comparações entre as curvas de MST , MSF , IAF e a P observadas e simuladas

para as condições climáticas utilizadas na calibração do modelo. Na segunda parte, foram comparados os valores de produtividade (P) observados e simulados para as condições climáticas das quatro regiões produtoras de arroz de terras altas.

4.3.1 Avaliação do crescimento da variedade cultivada de arroz de terras altas BRS-Primavera para as condições da calibração

Os dados utilizados na calibração do modelo foram obtidos de dois experimentos realizados pela EMBRAPA *Arroz e Feijão* em duas épocas de cultivo (17/11/2008 a 02/03/2009 e 29/12/2008 a 12/04/2009) durante a safra 2008/2009 no município de Santo Antônio de Goiás-GO. As curvas simuladas foram comparadas com os valores observados. Foram feitas duas avaliações, uma para cada experimento.

Na primeira avaliação, foram comparadas as curvas simuladas com os valores observados nas condições climáticas ocorridas no experimento realizado entre os dias 17/11/2008 e 2/03/2009. O gráfico de comparação entre as variáveis simuladas e as observadas é apresentado na Figura 22.

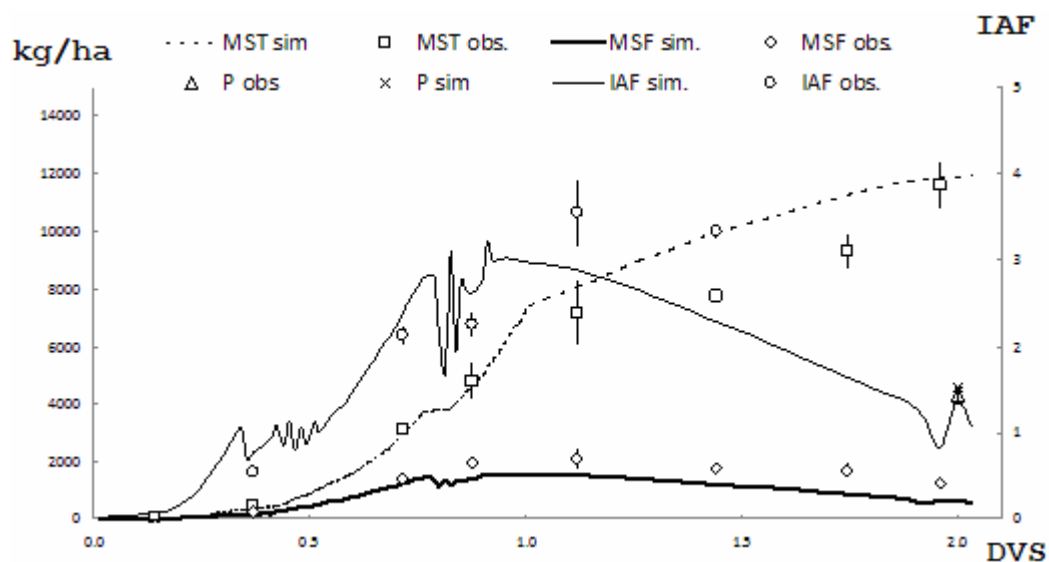


Figura 22 - Valores observados (*obs*) e simulados (*sim*), pelo modelo ORYZA-APSIM, de massa de matéria seca total (MST , $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) e de folhas verdes (MSF , $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), do índice de área foliar (IAF , $\text{m}^2\cdot\text{m}^{-2}$) e da produtividade (P , $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) em função dos estádios de desenvolvimento (DVS) do arroz de terras altas (cv. BRS-Primavera) para as condições climáticas ocorridas entre 17 de novembro de 2008 e 02 de março de 2009 em Santo Antônio de Goiás-GO

Percebe-se que os valores simulados *MST* até o estágio de desenvolvimento *DVS* 0,90 são semelhantes aos observados. Após este estágio, os valores simulados foram superiores aos observados, no entanto, a curva simulada descreve bem a resposta observada da *MST* até o estágio de desenvolvimento *DVS* 2. Neste estágio, o valor final da *MST* simulado foi semelhante ao observado, demonstrando um bom desempenho do modelo na simulação da *MST*.

O *IAF* apresenta oscilações entre os estágios de desenvolvimento *DVS* 0,33 e *DVS* 0,57. Essas oscilações são ocasionadas pela mudança na forma de calcular o índice de área foliar da fase exponencial (*IAF* menor ou igual a 1) para a fase linear de crescimento (*IAF* maior que 1). Bouman et al. (2001) descrevem que as diferentes maneiras utilizadas para calcular o crescimento foliar da fase exponencial e linear causam grandes oscilações no índice de área foliar no ponto de transição das duas fases. Bouman e Van Laar, (2006) mencionam que uma suavização nas oscilações do *IAF* no ponto de transição entre as duas fases é adotada pelo modelo, onde são utilizados valores ponderados, derivados das taxas de crescimento da área foliar usando a equação exponencial e linear. No entanto, percebe-se que a suavização adotada no modelo não foi capaz de corrigir as oscilações ocorridas. O *IAF* simulado foi semelhante ao observado até o estágio de desenvolvimento *DVS* 0,70. Após este estágio, os valores do *IAF* simulados e observados decrescem. Esse decréscimo pode ser explicado pela diminuição na translocação de assimilados para as folhas e o aumento da taxa senescência foliar ocorrida a partir do início do estágio de desenvolvimento reprodutivo (*DVS* 0,65). Os valores simulados a partir do estágio de desenvolvimento *DVS* 0,90 foram menores que os observados. Essa diferença entre o *IAF* calculado e observado pode ser atribuída à utilização da área foliar específica (*AFE*) na determinação do crescimento do *IAF*. A utilização da *AFE* para determinar o crescimento do *IAF* não proporcionou bons resultados. A utilização de outras variáveis que tenham melhores correlações com o crescimento da área foliar pode proporcionar melhores resultados. Van Oosterom et al. (2010) avaliando a dinâmica do nitrogênio nas partes vegetativas de três híbridos de sorgo, verificou que o nitrogênio foliar específico (*NFE*) apresentou boas correlações com o crescimento foliar.

Os valores simulados e observados da massa seca de folhas verdes *MSF* foram semelhantes até o estágio de desenvolvimento *DVS* 0,70. Nos estágios seguintes, os valores simulados foram inferiores aos observados. No entanto, a curva da simulação descreve com boa precisão a tendência da *MSF* durante todos os estágios de desenvolvimento da cultura.

A produtividade simulada foi semelhante à observada. O modelo demonstrou boa precisão na simulação da produtividade para a variedade cultivada de arroz de terras altas nessas condições.

Na segunda avaliação, foram comparadas as curvas simuladas com os valores observados nas condições climáticas ocorridas no experimento realizado entre os dias 29/12/2008 e 12/04/2009. O gráfico de comparação entre as variáveis simuladas e observadas é apresentado na Figura 23.

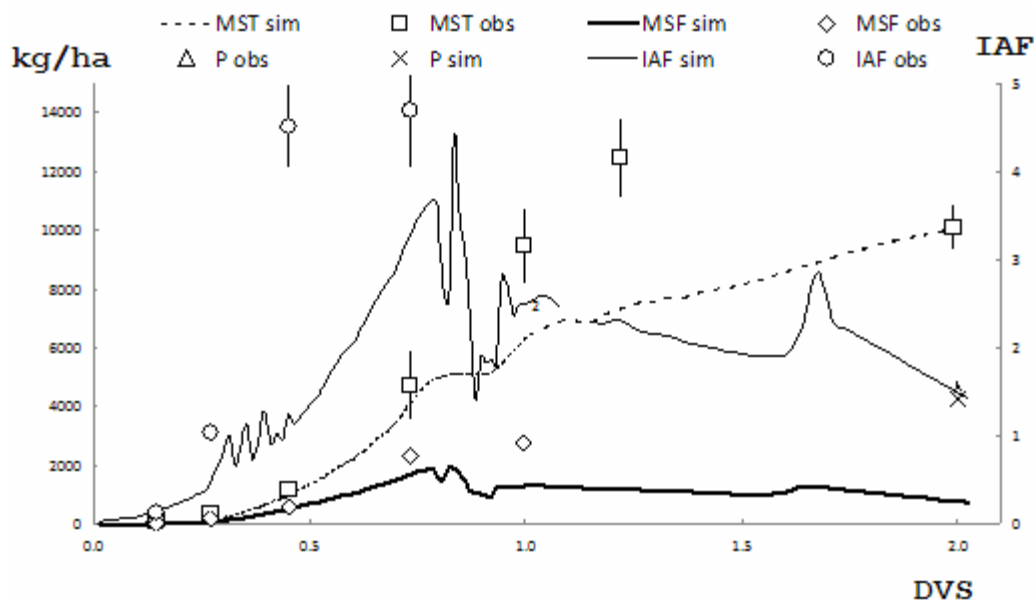


Figura 23 - Valores observados (*obs*) e simulados (*sim*), pelo modelo ORYZA-APSIM, de massa de matéria seca total (*MST*, $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) e de folhas verdes (*MSF*, $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), do índice de área foliar (*IAF*, $\text{m}^2\cdot\text{m}^{-2}$) e da produtividade (*P*, $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) em função dos estádios de desenvolvimento (*DVS*) do arroz de terras altas (cv. BRS-Primavera) para as condições climáticas ocorridas entre 29 de dezembro de 2008 e 12 de abril de 2009 em Santo Antônio de Goiás-GO

A *MST* simulada até o estágio de desenvolvimento *DVS* 0,70 foi semelhante aos valores observados. O aumento da *MST* simulada foi paralisado entre os estádios de desenvolvimento *DVS* 0,73 e o *DVS* 1,12. A paralisação do crescimento da *MST* neste período foi ocasionado por um período de estresse hídrico simulado pelo modelo (Figura 24). De acordo com Bouman et al. (2001), durante eventos de estresse hídrico o modelo inicia os cálculos dos fatores de estresse, que podem levar a diminuição ou a paralisação do crescimento da cultura. O valor da *MST* no estágio de desenvolvimento *DVS* 2 (maturidade fisiológica) foi semelhante ao valor observado, demonstrando bom desempenho do modelo na simulação do valor final da *MST*.

Ocorreram oscilações no *IAF* entre os estádios de desenvolvimento *DVS* 0,33 e *DVS* 0,57, explicações detalhadas destas oscilações são dadas na simulação anterior. Os valores do *IAF* foram subestimados pelo modelo durante a fase exponencial e linear do crescimento da área foliar. Ocorreu uma grande oscilação nos valores do *IAF* entre os estádios de desenvolvimento *DVS* 0,73 e *DVS* 1,12. A oscilação do *IAF* nessa fase também é atribuída à ocorrência de um estresse hídrico simulado pelo modelo (Figura 24). De acordo com Bouman et al. (2001), durante eventos de estresse, o modelo assume o aumento da taxa de senescência foliar. Este aumento promoveu decréscimos na área foliar verde, e conseqüentemente a diminuição do *IAF*. Lilley e Fukay (1994), estudando a fisiologia do arroz sob condições de deficiência hídrica, observaram que o estresse hídrico acelerou a taxa de senescência foliar no arroz.

A *MSF* simulada foi semelhante à observada até o estádio de desenvolvimento *DVS* 0,70. A partir desse estádio, a *MSF* simulada passou a ser inferior à observada. Observou-se uma oscilação e queda dos valores da *MSF* entre os estádios de desenvolvimento *DVS* 0,73 e *DVS* 1,12. A oscilação e a queda dos valores da *MSF* entre esses estádios de desenvolvimento são explicadas pelo aumento da senescência foliar, simulada durante o período de estresse hídrico (Figura 24).

A produtividade simulada foi semelhante a observada. Ao contrário do *IAF* e da *MSF*, o modelo apresentou bom desempenho na simulação da produtividade.

Representações do estresse hídrico simulado nas três primeiras camadas do solo (zona de profundidade radicular efetiva; 0-30 cm), e seus efeitos nas variáveis *MST*, *MSF* e *IAF* durante os estádios de desenvolvimento da cultura *DVS* 0,73 e *DVS* 1,12 são apresentadas na Figura 24.

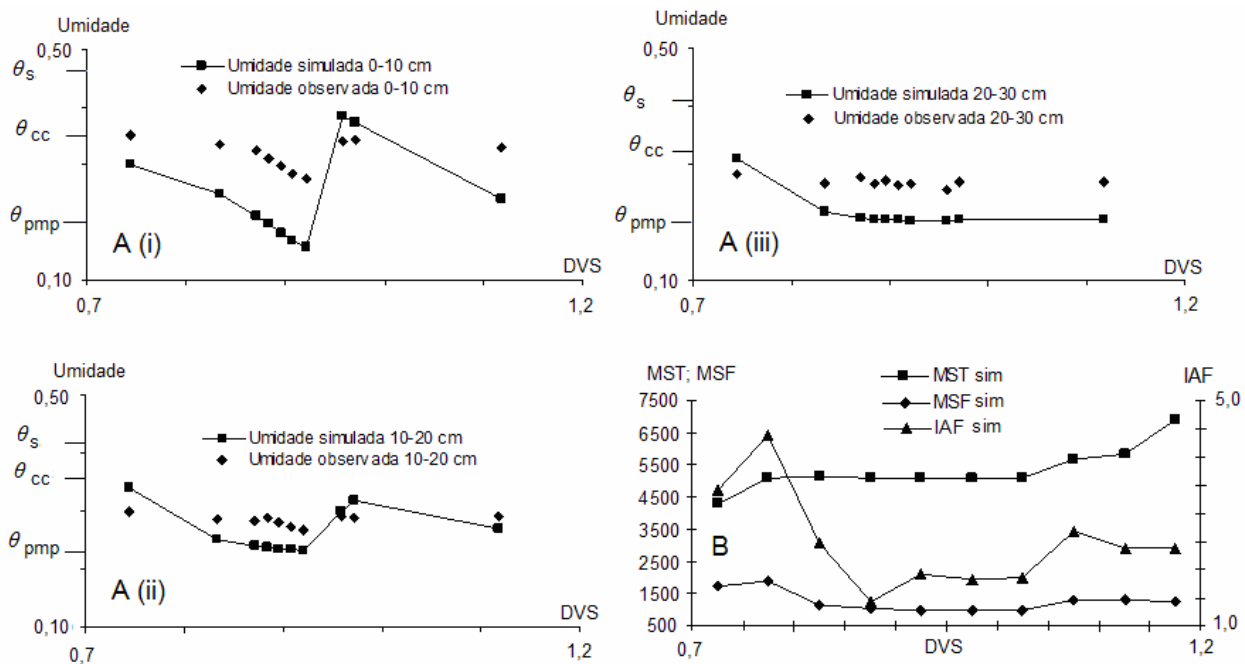


Figura 24 - (A) estresse hídrico simulado pelo modelo nas três primeiras camadas do solo (0-30 cm) entre os estádios de desenvolvimento *DVS* 0,73 e *DVS* 1,12 e as características das variáveis hídricas, *umidade de saturação* (θ_s ; $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$), *umidade de capacidade de campo* (θ_{cc} ; $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) e *umidade de ponto de murcha permanente* (θ_{pmp} ; $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) de cada camada: (i) umidade simulada e observada da primeira camada (0-10 cm) e as variáveis $\theta_s = 0,47 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, $\theta_{cc} = 0,35 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ e $\theta_{pmp} = 0,20 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$; (ii) umidade simulada e observada da segunda camada (10-20 cm) e as variáveis $\theta_s = 0,42 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, $\theta_{cc} = 0,35 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ e $\theta_{pmp} = 0,23 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$; (iii) umidade simulada e observada da terceira camada (20-30 cm) e as variáveis $\theta_s = 0,41 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, $\theta_{cc} = 0,32 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ e $\theta_{pmp} = 0,20 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$. (B) efeitos do estresse hídrico sobre as variáveis *MST*; *MSF* e *IAF* simuladas pelo modelo entre os estádios de desenvolvimento *DVS* 0,73 e *DVS* 1,12

4.3.2 Avaliação da produtividade da variedade cultivada de arroz de terras altas BRS-Primavera para as condições de quatro regiões produtoras de arroz

A avaliação da simulação da produtividade do modelo foi realizada por intermédio da comparação entre os valores simulados e observados obtidos de dez experimentos conduzidos pela EMBRAPA *Arroz e Feijão* durante vários anos nos municípios de Santo Antônio de Goiás-GO, Sorriso-MT, Gurupi-TO e Teresina-PI (Tabela 11). Foram realizadas simulações para cada um dos experimentos nas diferentes regiões produtoras.

Os valores observados e simulados para as diferentes localidades são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Erros relativos (E, %) e absolutos (Ps-Po, kg.ha⁻¹) e valores observados (Po, kg.ha⁻¹) e simulados (Ps, kg.ha⁻¹) da produtividade para diferentes regiões (Santo Antônio de Goiás-GO, Sorriso-MT, Gurupi-TO e Teresina-PI) produtoras de arroz de terras altas em função do dia da emergência nos diferentes locais e safras

I	Safra	Local	Emergência	Ps	Po	Ps-Po	E (%)
1	2005/2006	Santo Antônio de Goiás-GO	06/12/2005	4490	3856	634	16
2	2006/2007	Santo Antônio de Goiás-GO	28/11/2006	4153	4173	-20	0
3	2008/2009	Santo Antônio de Goiás-GO	11/12/2008	4000	3879	121	3
4	2008/2009	Santo Antônio de Goiás-GO	14/12/2008	3198	3516	-318	-9
5	2008/2009	Santo Antônio de Goiás-GO	17/11/2008	4574	4300 ¹	274	6
6	2008/2009	Santo Antônio de Goiás-GO	28/12/2008	4240	4480 ¹	-240	-5
7	2006/2007	Sorriso-MT	27/12/2006	4480	5067	-587	-12
8	2008/2009	Gurupi-TO	17/12/2008	4162	3688	474	13
9	2007/2008	Teresina-PI	15/01/2008	4860	4700	160	3
10	2008/2009	Teresina-PI	20/01/2009	4725	4961	-236	-5

Nota: ¹ Experimentos utilizados para calibração do modelo

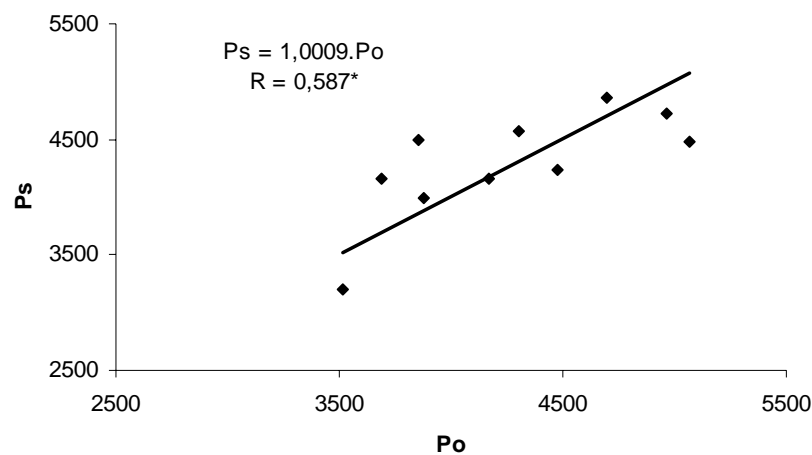


Figura 25 - Correlação entre produtividade simulada (Ps, kg.ha⁻¹) e observada (Po, kg.ha⁻¹) em quatro diferentes regiões (Santo Antônio de Goiás-GO, Sorriso-MT, Gurupi-TO e Teresina-PI) produtoras de arroz de terras altas (Tabela 11) (* Significativo ao nível de 10% - $r_{c(\alpha=0,10;gI=9)} = 0,521$) (SIEGLE, 2009)

A avaliação da produtividade do modelo ORYZA-APSIM foi realizada por meio de uma regressão linear estabelecida entre os valores de produtividade observados e simulados. A

correlação entre os valores simulados e observados foi avaliada por meio do coeficiente de correlação de Pearson, para um nível de significância de 10% ($\alpha = 0,1$) e 9 graus de liberdade (GL = 9). Foi verificado, ao nível de significância de 10%, que o modelo ORYZA-APSIM pode ser utilizado para determinar a ordem de grandeza da produtividade do arroz de terras altas em nível de região.

4.4 Considerações finais

O modelo apresentou bom desempenho nas simulações do desenvolvimento fenológico (número de dias das fases 1 e 2; emergência ao florescimento), nas regiões de maiores latitudes (Santo Antônio de Goiás-GO, Sorriso-MT e Gurupi-TO. No entanto, o número de dias simulados para as fases 1 e 2 na região de menor latitude (Teresina-PI) foi superior ao número observado, evidenciando uma superestimação do desenvolvimento fenológico adotado pelos cálculos do modelo. A incorporação de cálculos no modelo, que considerem uma faixa de temperatura ótima durante o desenvolvimento da cultura, pode diminuir essas penalizações, melhorar as simulações do desenvolvimento fenológico e permitir a comparação do genótipo entre o local para onde foi calibrado e localidades com grandes variações de latitudes.

As simulações do índice de área foliar na fase linear de crescimento diferiram muito dos valores observados. O índice de área foliar na fase linear de crescimento no modelo é calculado em função da área foliar específica. Sua utilização não proporcionou resultados satisfatórios para o *IAF*. A utilização de variáveis que tenham uma melhor correlação com o crescimento foliar, como o teor de nitrogênio específico foliar (*SLN*, g.m^{-2}) podem proporcionar melhores simulações do índice de área foliar.

As respostas fisiológicas da cultura sob condições de estresse hídrico adotadas pelo modelo, penalizam excessivamente o crescimento da cultura. Os fatores de estresse que são assumidos no modelo foram baseados em respostas fisiológicas de genótipos de arroz irrigado cultivado sob condições de solos inundados. Os genótipos de arroz irrigados são mais sensíveis ao estresse hídrico do que os genótipos de arroz de terras altas. A utilização de fatores de estresse obtidos a partir de observações das respostas fisiológicas de genótipos de arroz de terras altas cultivados sob diferentes condições de umidade no solo, podem diminuir as penalizações do crescimento e melhorar o desempenho das simulações do *IAF*, *MST* e *MSF* no modelo.

As simulações da produtividade apresentaram desempenho satisfatório. Os valores simulados tiveram boa correlação com os valores observados. O modelo ORYZA-APSIM simula

com boa precisão a produtividade da variedade cultivada de arroz de terras altas BRS-Primavera nas diferentes regiões produtoras.

Apesar das limitações, o modelo ORYZA-APSIM representou o desenvolvimento e o crescimento da variedade cultivada BRS-Primavera em função das variáveis climáticas (precipitação, radiação solar e temperatura).

5 CONCLUSÕES

Em função dos resultados obtidos, pode-se concluir que o modelo ORYZA-APSIM: (i) apresentou bom desempenho em simular o desenvolvimento fenológico da variedade cultivada de arroz de terras altas BRS-Primavera (número de dias da emergência a floração) nas regiões de maiores latitudes (Santo Antônio de Goiás-GO, Sorriso-MT e Gurupi-TO); (ii) não apresentou bom desempenho nas simulações do desenvolvimento fenológico (número de dias da emergência a floração) na região de Teresina-PI (o modelo superestima a duração dessa fase em regiões de menores latitudes); (iii) em Santo Antônio de Goiás-GO, apresentou bom desempenho na caracterização do crescimento da cultura na primeira data de semeadura, porém não apresentou bom desempenho na caracterização da variação temporal da massa de matéria seca total (MST , $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), massa de matéria seca de folhas verdes (MSF , $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) e índice de área foliar (IAF , $\text{m}^2\cdot\text{m}^{-2}$) na segunda data de semeadura, pois as simulações da MST e MSF e IAF foram comprometidas pelas penalizações utilizadas no modelo quando ocorre estresse hídrico e (iv) demonstrou desempenho satisfatório na simulação da produtividade do arroz de terras altas para as diferentes localidades ao nível de significância de 10% de probabilidade.

REFERÊNCIAS

- APSIM (AGRICULTURAL PRODUCTION SYSTEMS SIMULATOR). 2009. Disponível em: <<http://www.apsim.info/apsim/releases/Apsim70/Documentation/4%20Module%20Referencie/SoilWat.htm>>. Acesso em: 25 jun. 2009.
- ALFONSI, R.R.; PINTO, H.S.; PEDRO JÚNIOR, M.J. Estimativas das normais de temperaturas média mensal e anual do Estado de Goiás (BR) em função de altitude e latitude. **Caderno de Ciências da Terra**, São Paulo, v.45, p.1-6, 1974.
- ALVAREZ, R.C.F.; CRUSCIOL, C.A.C.; RODRIGUES, J.D.; ALVAREZ, A.C.C. Marcha de absorção de nitrogênio de cultivares de arroz de terras altas com diferentes tipos de plantas. **Científica**, Jaboticabal, v.34, n.2, p.162-169, 2006.
- AGÊNCIA NACIONAL DA ÁGUA). Disponível em: <<http://cadastrocthidro.ana.gov.br/relatorioProjeto.php?&id=637&voltar=projetos&orderBy=&filtro=®s=10&bt=&bn=&pag=1>>. Acesso em: 20 abr. 2009.
- ANDRADE JÚNIOR, A.S.; FIGUEREDO JÚNIOR, L.G.M.; CARDOSO, M.J.; RIBEIRO, V.Q. Parametrização de modelos agrometeorológicos para estimativa de produtividade da cultura do milho na região de Parnaíba, Piauí. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v.37, n.2, p.130-134, 2006.
- ARF, O.; RODRIGUES, R.A.F.; SÁ, M.E.; CRUSCIOL, C.A.C. Influência da época de semeadura no comportamento de cultivares de arroz (*Oryza sativa* L.) irrigado por aspersão na região de Selvíria (MS). **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, n.10, p.1967-1976, 2000.
- ARROZ BRASILEIRO. **Estatísticas: Brasil**; Tabela 1.01. Série histórica de produção (1998 - 2008). 2009a. Disponível em: <<http://www.arroz.agr.br/site/estatisticas/html/tab103.htm>>. Acesso em: 10 abr. 2009.
- ARROZ BRASILEIRO. **Estatísticas: Mundo-arroz em casca**; Tabela 2.01 - Série histórica: área, produção e produtividade mundial (1961 - 2007). 2009b. Disponível em: <<http://www.arroz.agr.br/site/estatisticas/html/tab101.htm>>. Acesso em: 10 abr. 2009.
- ARROZ E PECUÁRIA. **A lavoura de arroz**. 2009. Disponível em: <<http://www.arrozpec.com.br/>>. Acesso em: 7 ago. 2009.
- ASSIS, J.P.; DOURADO NETO, D.; REICHARDT, K.; MANFRON, P.A.; MARTIN, T.N.; BONNECARRÈRE, R.A.G. Dados climáticos simulados e produtividade potencial do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.41, n.5, p.731-737, 2006.
- AZAMBUJA, I.H.V.; VERNETTI JUNIOR.; F.J.; MAGALHÃES JÚNIOR, A.M. Aspectos socioeconômicos da produção de arroz. In: GOMES, A.S.; MAGALHÃES JÚNIOR, A.M. **Arroz irrigado no Sul do Brasil**. Brasília, EMBRAPA, 2004. p.23-44. (Informação Tecnológica)

BAKER, J.T.; ALLEN JÚNIOR, L.H.; BOOTE, K.J.; JONES, P.; JONES, J.W. Developmental responses of rice to photoperiod and carbon dioxide concentration. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.50, p.201-210, 1990.

BARATA, T.S. **Caracterização do consumo de arroz no Brasil**: um estudo na Região Metropolitana de Porto Alegre. 2005. 91p. Dissertação (Mestrado em Agronegócios) - Faculdade de Agronomia - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

BOOTE, K.J.; JONES, J.W.; HOOGENBOOM, G.; PICKERING, N.B. The Crop Model for grains legumes. In: TSUJI, G.Y.; HOOGENBOOM, G.; THORNTON, P.K. **Understanding Opinions for Agricultural Production**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1998. chap. 7, p 99-127.

BOUMAN, B.A.M.; KROPFF, M.J.; TUONG, T.P.; WOPEREIS, M.C.S.; TEN BERGE, H.F.M.; VAN LAAR, H.H. **ORYZA2000**: Modelling Lowland Rice. International Rice Research Institute, Wageningen University and Research Centre, Los Banõs, Philippines, Wageningen, Netherlands, 2001. p.235.

BOUMAN, B.A.M.; VAN LAAR, H.H. Description and evaluation of rice growth model ORYZA2000 under nitrogen-limited conditions. **Agricultural Systems**, Essex, v.87, n.3, p.249-273, 2006.

BRESEGHELLO, F.; MORAIS, O.P.; CASTRO, E.M. **Cultivo do arroz de terras altas no Mato Grosso**: Cultivares. 2006. EMBRAPA ARROZ E FEIJÃO. Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Arroz/ArrozTerrasAltasMatoGrosso/cultivares.htm#prim>>. Acesso em: 8 ago. 2009.

BUENO, L.G.; ROLIM, R.B.; MONTEIRO, P.M.F.O.; NEIVA, L.C.S, STEINDORRFF, A.P. **Estudos de fotoperiodismo em arroz e soja**. Goiânia: ENGOPA, 1981. 84p. (ENGOPA. Boletim Técnico, 9)

BURIOL, G.A.; ESTEFANEL, V.; FERREIRA, M.; PINTO, H.S. Estimativa das médias das temperaturas máximas mensais e anuais do Estado do Rio Grande do Sul. **Revista do Centro de Ciências Rurais**, Santa Maria, v.3, p.131-150, 1973.

BURIOL, G.A.; FERREIRA, M.; ESTEFANEL, V.; PIGNATARO, I.A.B. Estimativa das médias das temperaturas máximas mensais e anuais do Estado de Santa Catarina. **Revista do Centro de Ciências Rurais**, Santa Maria, v.4, p.81-102, 1974.

CANTRELL, R. **Arroz: Por quê é tão essencial para a segurança e estabilidade global. Perspectivas Econômicas**, publicação eletrônica do Departamento de Estado dos Estados Unidos, v.7, n.2, p.22-25, 2002.

CARON, B.O.; MANFRON, P.A.; LÚCIO, A.D.; SCHMIDT, D.; MEDEIROS, S.L.P.; BONNECARRÈRE, R.A.G.; DOURADO NETO, D. Equações de estimativa da fitomassa da parte aérea da alfaca. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.37, n.5, p.1248-1254, set./out. 2007.

CASTRO, E.M.; BRESEGHELLO, F.; MORAIS, O.P. **Cultivo do arroz de terras altas: Cultivares**. 2003. Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Arroz/ArrozTerrasAltas/cultivares.htm>>. Acesso em: 31 jul. 2009.

CEPEA (CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA). **Projeto pioneiro pesquisa arroz de terras altas**. 2002. Disponível em: <<http://www.cepea.esalq.usp.br>>. Acesso em: 14 abr. 2009.

CHAPMAN, S.; HAMMER, G.L.; BUTLER, D.G.; COOPER, M. Genotype by environment interactions affecting grain sorghum. III. Temporal sequences and spatial patterns in the target population of environments. **Australian Journal of Agricultural Research**, Victoria, v.51, n.2, p.223-234, 2000.

CHAVES, M.M.; OLIVEIRA, M.M. Mechanisms underlying plant resilience to water deficits: prospects for water-saving agriculture, **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v.55, p.2365-2384, 2004.

CONAB (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO). **Acompanhamento de safra brasileira 2009**. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/conabweb/download/safra/6graos_08.09.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2009.

COSTA, A.A. **Condições para implantação do contrato futuro de arroz no Brasil**. 2008. 134p. Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

CRUSCIOL, C.A.C.; ARF, O.; SORATTO, R.P.; MACHADO, J.R. Extração de macronutrientes pelo arroz de terras altas sob diferentes níveis de irrigação por aspersão e de adubação. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v.9, n.2, p.145-150, 2003a.

CRUSCIOL, C.A.C.; ARF, O.; SORATTO, R.P.; MACHADO, J.R. Influência de lâminas de água e adubação mineral na nutrição e produtividade de arroz de terras altas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, n.4, p.647-654, 2003b.

CRUSCIOL, C.A.C.; SORATTO, R.P.; ARF, O. Produtividade de grãos e exportação de nutrientes de cultivares de arroz irrigadas por aspersão em consequência da época de semeadura. **Bragantia**, Campinas, v. 66, n.2, p.247-257, 2007.

DOURADO NETO, D. Principles of crop modeling and simulation. I. Uses of mathematical models in agriculture science. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v.55, (número especial), p.46-50, 1998.

EMBRAPA CLIMA TEMPERADO. **Cultivo de arroz irrigado no Brasil: importância econômica, agrícola e alimentar do arroz**. 2005a. Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Arroz/ArrozIrigadoBrasil/cap01.htm>>. Acesso em: 5 abr. 2009.

_____. **Cultivo de arroz irrigado no Brasil:** consumo, mercado e comercialização no Brasil. 2005b. Disponível em:
<<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Arroz/ArrozIrrigadoBrasil/cap18.htm>>. Acesso em: 5 abr. 2009.

_____. **Cultivo do arroz irrigado no Brasil:** manejo da água em arroz irrigado. 2005c. Disponível em:
<<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Arroz/ArrozIrrigadoBrasil/cap10.htm>>, Acesso em: 3 ago. 2009.

EMBRAPA ARROZ E FEIJÃO. **Cultivar Primavera**, 2009. Disponível em:
<<http://www.cnpaf.embrapa.br/arroz/primavera.htm>>. Acesso em: 8 ago. 2009.

FERREIRA, C.M.; VILLAR, P.M. **Cultivo do arroz de terras altas:** importância econômica. 2003. Embrapa Arroz e Feijão. Disponível em:
<<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Arroz/ArrozTerrasAltas/importancia.htm>>. Acesso em: 7 ago. 2009.

FERREIRA, A. **O estado real das águas no Brasil 2003-2004**. Brasília: Defensoria da Água, 2004. 24 p. Relatório apresentado na Conferência Nacional do Bispo do Brasil-CNBB. 2004.

FERREIRA, W.P.M.; COSTA, L.C.; SOUZA, C.F. Teste de um modelo agrometeorológico para estudo da influência da variabilidade climática na cultura da soja. **Revista Ceres**, Viçosa, v.54, n.312, p.206-213, 2007.

FIGUEREDO JÚNIOR, L.G.M. **Modelo para estimação da produtividade de grãos de milho no Estado de São Paulo**. 2004. 68p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

FIORAVANTE, C. As faces do tempo: A prioridade agora é priorizar que os desastres naturais piorem a vida de milhões de pessoas. **Pesquisa FAPESP**, São Paulo, n.151, 2008.

FONSECA, E.L.; FORMAGGIO, A.R.; PONZONI, F.J. Parametrização de modelo agrometeorológico espectral para estimativa da produção das pastagens do bioma Campos Sulinos (RS) In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. **Anais...Goiânia:** IMPE, 2005. p.127-134.

FORNASIERI FILHO, D.; FORNASIERI, J.L. **Manual da cultura do arroz**. Jaboticabal: FUNEP, 2006. 589p.

FUKAI, S. Phenology in rainfed lowland rice. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.64, n.1, p.51-60, 1999.

GAO, L.Z.; JIN, Z.Q.; HUANG, L.Z.; ZHANG, L.Z. Rice clock model: a computer model to simulate Rice development. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.60, p.1-16, 1992.

GAYDON, D.S.; LISSON, S.N.; XEVI, E. **Application of APSIM ‘multi-paddock’ to estimate whole-of-farm water-use efficiency, system water balance and crop production for a rice-based operation in the Coleambally Irrigation District, NSW**, 2006. Disponível em: <http://www.regional.org.au/au/asa/2006/concurrent/water/4632_gaydond.htm>. Acesso em: 11 ago. 2009.

HEINEMANN, A.B.; HOOGENBOOM, G.; GEORGIEV, G.A.; FARIA, R.T.; FRIZZONE, J.A. Center pivot irrigation management optimization of dry beans in humid areas. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St Joseph, v.43, n.6, p.1507-1516, 2000.

HEINEMANN, A.B.; HOOGENBOOM, G.; FARIA, R.T. Determination of spatial water requirements at county and regional levels using crop models and GIS An example for the State of Paraná, Brazil. **Agricultural and Water Management**, Amsterdam, v.52, p.177-196, 2002.

HEINEMANN, A.B.; SILVA, S.C.; LOPES JÚNIOR, S.; ANDRADE, C.L.T.; BASTOS, E.A.; PAZ, R.L. **Características climáticas dos municípios de Santo Antônio de Goiás (GO), Porangatu (GO), Janaúba (MG), Sete Lagoas (MG), Parnaíba (PI) e Teresina (PI), Brasil**. Brasília, EMBRAPA, 2007, 36 p. (CNPAP. Documentos, 214)

HEINEMANN, A.B.; LUQUET, D.; DINGHUN, M.; CHAPMAN, S. **Crop model assisted characterization of appropriate traits for rice TPE in Brazilian Cerrados**. 2008a. Disponível em: <http://www.generationcp.org/UserFiles/File/c2_6_heinemann.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2009.

HEINEMANN, A.B.; LUQUET, D.; DINGHUN, M.; COMBRES, J.C.; CHAPMAN, S. Characterization of drought stress environments for upland rice and maize in central Brazil. **Euphytica**, Wageningen, v.162, n.3, p.395-410, 2008b.

HOOGENBOOM, G.; WILKENS, P.W.; TSUJI, G.Y. (Ed.). **DSSAT Version 3**. Honolulu: University of Hawaii, 1999. v.4. p.2-36.

HORIE, T. Predicting the effects of climatic variation and effect of CO₂ on rice yield in Japan. **Japan Agricultural Meteorology**. Tokyo, v.48, p.567-574, 1993.

HORIE, T. The effects of climatic variations on agriculture in Japan: The effects on rice yields in Hokkaido. In: PARRY, M.L.; CARTER, T.L.; KONIJN, N.T. **The Impact of climatic variations on agriculture, assessments in cool temperature and cold regions**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1998. Chap. 5, p.809-826.

IRGA (INSTITUO RIO GRANDENSE DO ARROZ). **Dados de safra. Série histórica da área plantada, produção e rendimento**. 2008. Disponível em: <<http://www.irga.rs.gov.br/arquivos/20081013131548.pdf>>. Acesso em: 5 abr. 2009.

IRRI (INTERNATIONAL RICE RESEARCH INSTITUTE). 2009. Disponível em: <<http://www.knowledgebank.irri.org/oryza2000/>>. Acesso em: 28 jun. 2009.

JONES, C.A.; KINIRY, J.R. **CERES-Maize**: a simulation model of maize growth and development. College Station: A & M University, 1986. 194p.

JONES, J.W.; HOOGENBOOM, G.; PORTER, C.H.; BOOTE, K.J.; BATCHELOR, W.D.; HUNT, L.A.; WILKENS, P.W.; SINGH, U.; GIJSMAN, A.J.; RITCHIE, J.L. The DSSAT cropping system model. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v.18, p.235-265, 2003.

KIJNE, J.W. Abiotic stress and water scarcity: Identifying and resolving conflicts from plant level to global level, **Field Crops Research**, Amsterdam, v.97, p.3-18, 2006.

KROPFF, M.J.; VAN LAAR, H.H.; MATTHEWS, R.B. ORYZA-1: An ecophysiological model for irrigated rice production. In: SARP RESEARCH, 1994. Los Baños. **Proceedings...** Wageningen: International Rice Research Institute, 1994. 110p.

LAFITTE, H.R.; LI, Z.K.; VIJAYAKUMAR, C.H.M.; GAO, Y.M.; SHI, Y.; XU, J.L.; FU, B.Y.; YU, S.B.; ALI, A.J.; DOMINGO, J.; MAGHIRANG, R.; TORRES, R.; MACKILL, D. Improvement of rice drought tolerance through backcross breeding: evaluation of donors and selection in drought nurseries, **Field Crops Research**, Amsterdam, v.97, p.77-86, 2006.

LANA, A.C.; FERREIRA, C.M.; BARRIGOSI, J.A.F. **Impacto ambiental e econômico da cultura de arroz de terras altas: caso da cultivar BRS-Primavera**. Brasília: EMBRAPA, 2003. 3p. (CNPAP. Comunicado técnico, 58)

LILLEY, J.M.; FUKAY, S. Effect of timing and severity of water deficit on four diverse rice cultivars. II. Physiological responses to soil water deficit. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.37, n.3, p.215-223, 1994.

LITTLEBOY, M.; SILBURN, D.M.; FREEBAIRN, D.M.; WOODRUFF, D.R.; HAMMER, G.L.; LESLIE, J.K. Impact of soil erosion on production in cropping systems. I. Development and validation of a simulation model. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, n 5, v.30, p.757-774, 1992.

LIU, L.; LAFITTE, R.; GUAN, D. Wild *Oryza* species as potential sources of drought-adaptive traits. **Euphytica**, Wageningen, v.138, p.149-161, 2004.

LOPES, S.J.; DOURADO NETO, D.; MANFRON, P.A.; JASNIEWICZ, L.R. Models to estimate dry matter accumulation on hydroponics' lettuce. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.61, n.4, p.392-400, 2004.

LUZZARDI, R.; SARAIVA, C.T.; BOCK, F.; WEBER, L.; PASQUALLI, L. Avaliação preliminar da produtividade em campo e qualidade industrial de híbridos de arroz no Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 4., 2005, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: Sociedade Sul-Brasileira de arroz irrigado, 2005. v.1, p.70-72.

MALL, R.K.; AGGARWAL, P.K. Climate change and rice yields in diverse agro-environments of India. I. Evaluation of impact assessment models. **Climatic Change**, Dordrecht, v.52, p.315-330, 2002.

MORAIS, O.P.; CORNÉLIO, V.M.O.; REIS, M.S.; SOARES, P.C.; SANTOS, P.G.; SOUSA, M.A. **BRS-MG Curinga**: cultivar de arroz de terras altas de ampla adaptação para o Brasil. Brasília: EMBRAPA. 2005. 8p. (CNPAP. Comunicado Técnico, 114)

- OLIVEIRA NETO, S.N.; REIS, G.G.; REIS, M.G.F.; LEITE, H.G.; COSTA, J.M.N. Estimativa de temperaturas mínima, média e máxima do território brasileiro situado entre 16 e 24° latitude sul e 48 e 60° longitude oeste. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v.10, p.8-17, 2002.
- PANDOLFO, C. **Parâmetros básicos para uso na modelagem do rendimento de matéria seca em alfafa (*Medicago sativa* L.)**. 1995. 128 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Faculdade de Agronomia, Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1995.
- PENNING DE VRIES, F.W.T; VAN LAAR, H.H. (Ed.). Simulation of plant growth and crop production. Pudoc Bulletin, Wageningen, 1982. 308p. (Simulations Monographs)
- PENNING DE VRIES, F.W.T.; JANSEN, D.M.; TEN BERGER, H.F.N.; BAKENA, A. **Simulation of ecophysiological process of growth in several annual crops**. Pudoc Bulletin, Wageningen, 1989. 271p. (Simulations Monographs.)
- PINHEIRO, B.S. **Arroz de terras altas: um salto de qualidade no Centro-Oeste do Brasil**. 2002. Disponível em: <http://www.arroz.agr.br/site/artigos/020917.php>. Acesso em: 29 jul. 2009.
- PINHEIRO, B.S. **Cultivo do arroz de terras altas: Características da cultura**. 2003. Embrapa Arroz e Feijão. Disponível em: <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Arroz/ArrozTerrasAltas/index.htm> Acesso em: 29 jul. 2009.
- PLANETA ARROZ. **O peso da qualidade: Mercado premia o diferencial e não o peso**. 2005. Disponível em: http://www.planetaarroz.com.br/edicoes/15/06_negocio_capa_pag01.php. Acesso em: 7 ago. 2009.
- RDH (RELATÓRIO DO DESENVOLVIMENTO HUMANO). **A competição pela água na agricultura**. 2006a, Disponível em: http://hdr.undp.org/en/media/06-chapter5_pt1.pdf, Acesso em: 3 ago. 2009.
- RDH (RELATÓRIO DO DESENVOLVIMENTO HUMANO). **Os agricultores pobres enfrentam uma dupla crise da água: as alterações climáticas e a competição**. 2006b. Disponível em: http://akgul.bilkent.edu.tr/hdr/hdr2006/press/releases/portuguese/RP4-HDR06_PR4-PORT.pdf, Acesso em: 3 ago. 2009.
- REIS, M.S.; SOARES, A.A.; CORNÉLIO, V.M.O.; SOARES, P.C. Desempenho de cultivares e linhagens de arroz de terras altas sob plantio direto e convencional. **Ciência Agrotécnica**, Lavras, v.32, n.5, p.1435-1440, set./out. 2008.
- RITCHIE, J.T. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. **Water Resources Research**, Washington, v.8, p.1204-1213, 1992.
- SANTOS, A.B.; RABELO, R.R. **Cultivo do arroz irrigado no Estado do Tocantins: introdução e importância econômica**. EMBRAPA Arroz e Feijão. 2004. Disponível em: <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Arroz/ArrozIrigadoTocantins/index.htm>. Acesso em: 29 jul. 2009.

SANTOS, M.A.; CAMARGO, M.B.P. Parametrização de modelo agrometeorológico de estimativa de produtividade do cafeeiro nas condições do estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v.65, n.1, p.173-183, 2006.

SIEGLE, D. **Critical Values of the Pearson Product-Moment Correlation Coefficient**. 2009. Disponível em: <<http://www.gifted.uconn.edu/siegle/research/Correlation/corrchrt.htm>>. Acesso em: 20 nov. 2009.

SOARES, A.A.; CORNÉLIO, V.M.O.; SOARES, P.C.; SANTOS, P.G.; REIS, M.S. Primavera: cultivar de arroz com grãos agulhinha para cultivo em terras altas. **Revista Ceres**. Viçosa, v.48, n.277, p.381-388, 2001.

SOARES, A.A.; SOARES, P.C.; REIS, M.S.; CORNÉLIO, V.M.O.; SILVA, F.L. **Cultivares de arroz de terras altas recomendadas para Minas Gerais**. Belo Horizonte, 2008, 5p. (Circular Técnica ,14)

SOUZA, N.R.G.; BRESEGHELLO, F. **Cultivares de arroz para o Estado do Mato Grosso**. 2007. Disponível em: < http://www.mt.gov.br/wps/portal?cat=Agricultura%2C+Extrativismo+e+Pesca&cat1=com.ibm.workplace.wcm.api.WCM_Category%2FArroz%2Fdc981548231e34e&con=com.ibm.workplace.wcm.api.WCM_Content%2FCultivares+de+arroz%2Fe53cd90f37334b5&showForm=no&siteArea=In%C3%ADcioeWCM_GLOBAL_CONTEXT=/wps/wcm/connect/e-MatoGrosso/Estado/Informa%C3%A7%C3%B5es/Cultivares+de+arroz>. Acesso em: 7 ago. 2009.

SPOHR, R.B. **Seqüência de cultivos irrigados de verão com arroz de terras altas e milho ou sorgo silagem**. 2003. 78p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

STEINMETZ, S.; MEIRELES, E.J.L.M. Clima. In: VIEIRA, N.R.S.; SANTOS, A.B.; SANT'ANA, E.P. (Ed.). **A cultura do arroz no Brasil**. Santo Antônio de Goiás: EMBRAPA Arroz e Feijão, 1999. 633p.

STONE, L.F.; PEREIRA, A.L. Sucessão arroz-feijão irrigado por aspersão: efeitos de espaçamento, entrelinhas, adubação e cultivar na produtividade e nutrição do arroz. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.29, n.11, p.1701-1713, 1994.

STRECK, N.A.; BOSCO, L.C.; MICHELON, S.; WALTER, L.C.; MARCOLIN, E. Duração do ciclo de desenvolvimento de cultivares de arroz em função da emissão de folhas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, n.4, p.1086-1093, 2006.

SUMMERFIELD, R.J.; COLLINSON, S.T.; ELLIS, E.H.; ROBERTS, E.M.; PENNING DE VRIES, F.W. Photothermal responses of flowering in rice (*Oryza sativa*). **Annals of Botany**, Oxford, v.69, n.2, p.101-112, 1992.

SWAIN, D.K.; HERATH, S.; BHASKAR, B.C.; KRISHNAN, P.; RAO, K.S.; NAYAK, S.K.; DASH, R.N. Developing oryza for medium- and

[long - duration rice: variety selection under non water stress conditions. **Agronomy Journal**, Madison, v.99, p.428-440, 2007.

TAO, F.; HAYASHI, Y.; ZHANG, Z.; SAKAMOTO T.; YOKOZAWA, M. Global warming, rice production, and water use in China: Developing a probabilistic assessment. **Agricultural Forest and Meteorology**, Amsterdam, v.148, n.1, p.94-110, Jan. 2008.

TINSINA, J.; HUMPHREYS, E. Performance of CERES-Rice and CERES-Wheat models in rice-wheat systems: A review. **CSIRO**, Melbourne, v.90, p.5-31, 2006.

TOESCHER, C.F.; RIGHES, A.A.; CARLESSO, R. Volume de água aplicada e produtividade do arroz sob diferentes métodos de irrigação. **Revista da Faculdade de Zootecnia e Veterinária Agrônômica**, Uruguaiana, v.4, n.1, p.75-79, 1997.

TONIETTO, J.; MANDELLI, F. **Uvas viníferas para processamento em regiões de clima temperado**: Clima, 2003. Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Uva/UvasViniferasRegioesClimaTemperado/clima.htm>>. Acesso em: 6 nov. 2009.

USDA (UNITED STATE DEPARTMENT OF AGRICULTURE). **Field Crops production**. 2005. Disponível em: <<http://www.fas.usda.gov/psdonline/psdhome.aspx>>. Acesso em: 7 ago. 2009.

VAN KEULEN, H.; PENNING DE VRIES, F.W.T.; DREES, E.M. A summary model for crop growth. In: PENNING DE VRIES, F.W.T.; VAN LAAR, H.H. **Simulation of plant growth and crop production**. Wageningen, Pudoc, 1992. p.87-89. (Simulation Monographs).

VAN OOSTEROM, E.J.; BORRELL, A.K.; CHAPMAN, S.C.; BROAD, I.J.; HAMMERA, G.L. Functional dynamics of the nitrogen balance of sorghum: I. N demand of vegetative plant parts. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.115, n.1, p.19-28, 2010.

ZAFARONI, E.; TAVARES, V.E. **O licenciamento ambiental dos produtores de arroz irrigado no rio grande do sul, Brasil**. 2009. Disponível em: <<http://www.iica.org.uy/p2-8.htm>>. Acesso em: 7 ago. 2009.

ZEBU PARA O MUNDO. **Consumo supera produção mundial de arroz**. 2008. Disponível em: <http://www.zebuparaomundo.com/zebu/index2.php?option=com_content&do_pdf=1&id=859>. Acesso em: 31 abr. 2009.

ZHANG, X.; MEINKE, H.; DEVOIL, P.; VAN LAAR, G.; BOUMAN, B.A.M.; ABAWI, Y. **Simulating growth and development of lowland rice in APSIM**. 2004. Disponível em: <http://www.cropscience.org.au/icsc2004/poster/2/8/1212_zhang.htm>. Acesso em: 28 jun. 2009.

ZHANG, X.; LEE, J.H.C.; ABAWI, Y.; KIM, Y.; Mc CLYMONT, D.; KIM, H.D. Testing the simulation capability of APSIM-ORYZA under different levels of nitrogen fertilizer and transplanting time regimes in Korea. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, Melbourne, v.47, n.12, p.1446-1454, 2007.

Livros Grátis

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

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

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

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

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