

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

Giovana Ghisleni Ribas

**MELHORA NA SIMULAÇÃO DA PRODUTIVIDADE DE ARROZ NO
RIO GRANDE DO SUL PELA INTRODUÇÃO DE ARROZ HÍBRIDO
NO MODELO SIMULARROZ**

Santa Maria, RS
2016

Giovana Ghisleni Ribas

**MELHORA NA SIMULAÇÃO DA PRODUTIVIDADE DE ARROZ NO RIO
GRANDE DO SUL PELA INTRODUÇÃO DE ARROZ HÍBRIDO NO MODELO
SIMULARROZ**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Área de concentração em engenharia de água e solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Agrícola**

Orientador: Prof. Dr. Nereu Augusto Streck

Santa Maria, RS
2016

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Ghisleni Ribas, Giovana
MELHORA NA SIMULAÇÃO DA PRODUTIVIDADE DE ARROZ NO RIO GRANDE DO SUL PELA INTRODUÇÃO DE ARROZ HÍBRIDO NO MODELO SIMULARROZ / Giovana Ghisleni Ribas.-2015.
73 p.; 30cm

Orientador: Nereu Augusto Streck
Coorientadora: Isabel Lago
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, RS, 2015

1. Calibrar e avaliar o desempenho do modelo SimulArroz em simular o número de folhas, fenologia, matéria seca e a produtividade de três cultivares de arroz híbrido no Rio Grande do Sul. I. Streck, Nereu Augusto II. Lago, Isabel III. Título.

© 2016

Todos os direitos autorais reservados a Giovana Ghisleni Ribas. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante citação da fonte.

Endereço: Rua 3 Parque Estação Colônia, n.90, Bairro Camobi, Santa Maria, RS. CEP: 97105-284

Fone: (055)55 99622049; E-mail: giovana.ghisleni@hotmail.com

Giovana Ghisleni Ribas

**MELHORA NA SIMULAÇÃO DA PRODUTIVIDADE DE ARROZ NO RIO
GRANDE DO SUL PELA INTRODUÇÃO DE ARROZ HÍBRIDO NO MODELO
SIMULARROZ**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Área de concentração em engenharia de água e solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Agrícola**

Aprovado em 25 de Fevereiro de 2016:

Nereu Augusto Streck, Ph.D.
(Presidente/Orientador)

Isabel Lago, Dra. (UFSM)

Silvio Steinmetz, Dr. (EMBRAPA)

Santa Maria, RS
2016

AGRADECIMENTOS

A Universidade Federal de Santa Maria e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do trabalho de mestrado.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa– CNPq, pela concessão da bolsa de estudos.

Ao professor Nereu Augusto Streck, por ter orientado e participado do processo de elaboração e execução deste trabalho sempre com muita dedicação, incentivo, compreensão e, principalmente, amizade.

Ao Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA) que disponibilizou sua área para coleta de dados nos municípios de Cachoeirinha, Santa Vitória do Palmar e Uruguaiana.

Aos pesquisadores do IRGA, principalmente Alencar Zanon, Élio Marcolin e Daniel Arthur Gaklik Waldow pela hospitalidade e boa vontade em nos receber.

Ao Grupo de Agrometeorologia que contribuiu para a realização deste trabalho, em especial Thiago Schmitz Marques da Rocha, Ary José Duarte Junior, Mathias Ferreira da Costa e Moisés Freitas do Nascimento.

Aos bolsistas PIBIC/IRGA Douglas Lemos Machado, Robson Lopes e Édison de Souza pela grande colaboração durante o desenvolvimento deste trabalho.

A minha família pela compreensão e apoio durante o mestrado, principalmente a minha mãe “Dona Vera” .

A todos os amigos pelo apoio.

Nenhum trabalho de qualidade pode ser feito
sem concentração, auto sacrifício, esforço e
dúvida.

(Max Beerbohm)

RESUMO

MELHORA NA SIMULAÇÃO DA PRODUTIVIDADE DE ARROZ NO RIO GRANDE DO SUL PELA INTRODUÇÃO DE ARROZ HÍBRIDO NO MODELO SIMULARROZ.

AUTORA: Giovana Ghisleni Ribas
ORIENTADOR: Nereu Augusto Streck

O arroz híbrido vem ganhando importância por apresentar um potencial produtivo maior do que as cultivares convencionais tradicionalmente semeadas no Sul do Brasil. O modelo SimulArroz é um modelo matemático dinâmico determinístico que simula o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade de grãos na cultura do arroz, no entanto a versão atual do SimulArroz (versão 1.0) não contém a opção de simulação para arroz híbrido. Assim, o objetivo nesta dissertação foi calibrar e avaliar o desempenho do modelo SimulArroz em simular o número de folhas, fenologia, o acúmulo de matéria seca e a produtividade de três cultivares de arroz híbrido no Rio Grande do Sul. Foram conduzidos experimentos de campo em Santa Maria, e nas estações regionais de pesquisa do Instituto Rio Grandense do Arroz de Cachoeirinha, Uruguaiana, Santa Vitória do Palmar, Cachoeira do Sul, Bagé e Camaquã. Foram determinados o número de folhas do colmo principal através da escala da Haun e a fenologia conforme a escala de Counce, e também, foram realizadas amostragens de plantas em Santa Maria e Cachoeirinha para determinar a matéria seca total da parte aérea, de folhas, de colmos, de folhas senescentes e produtividade de grãos. O modelo SimulArroz está calibrado e avaliado para simular o número de folhas no colmo principal, representado pelo Estádio de Haun, a fenologia, a matéria seca total da parte aérea, de folhas, de colmos, de folhas senescentes e a produtividade de grãos a 13% de umidade de três híbridos de arroz irrigado no Rio Grande do Sul.

Palavras-chave: *Oryza sativa* L. Escala de Haun. Desenvolvimento. Emissão de folhas. Soma térmica. Crescimento. Partição de matéria seca. Produtividade.

ABSTRACT

IMPROVING THE SIMULATION OF RICE PRODUCTIVITY IN RIO GRANDE DO SUL BY INTRODUCING HYBRIDS IN THE SIMULARROZ MODEL

AUTHOR: Giovana Ghisleni Ribas

ADVISOR: Nereu Augusto Streck

The importance of hybrid rice is increasing because of its higher potential yield compared to conventional varieties traditionally sown in southern Brazil. The SimulArroz model is a dynamic deterministic mathematical model that simulates the growth, development and grain yield in rice, but the current version of SimulArroz (version 1.0) does not contain the option for hybrid rice. The objective of this dissertation was to calibrate and evaluate the performance of SimulArroz model in simulating the number of leaves, phenology, dry matter accumulation and grain yield of three hybrid rice cultivars in Rio Grande do Sul State, Brazil. Field experiments were conducted in Santa Maria, and in research stations of the Instituto Rio Grandense do Arroz in Cachoeirinha, Uruguaiana, Santa Vitória do Palmar, Cachoeira do Sul, Bagé and Camaquã. The number of main stem leaves, based on the Haun scale, and phenology, based on the Counce scale, and also, plant samples were collected in Santa Maria and Cachoeirinha to determine the dry matter of shoots, leaves, culms, senescent leaves and grain yield. The SimulArroz model is calibrated and evaluated to simulate the number of leaves on the main stem, represented by Haun Stage, phenology, the total dry matter above ground, leaves, stems, senescent leaves and grain yield at 13 % moisture of three hybrid rice cultivars in Rio Grande do Sul.

Key words: *Oryza sativa*. Haun scale. Development. Leaf appearance. Thermal time. Growth. Dry matter partitioning. Yield.

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1 — Híbridos de arroz, locais e datas de semeadura dos experimentos de arroz irrigado por inundação usados para a calibração e para a avaliação (dados independentes) dos sub-modelos de emissão de folhas e da fenologia no modelo SimulArroz no Rio Grande do Sul.38
- Tabela 2 — Híbridos de arroz, locais e datas de semeadura dos experimentos de arroz irrigado por inundação usados para a calibração e para a avaliação (dados independentes) do sub-modelo de matéria seca no modelo SimulArroz no Rio Grande do Sul.. 39
- Tabela 3 — Híbridos de arroz, locais e datas de semeadura dos experimentos de arroz irrigado por inundação usados para a calibração e para a avaliação (dados independentes) do sub-modelo da produtividade no modelo SimulArroz no Rio Grande do Sul. Os dados independentes são de ensaios de Valor de Cultivo e Uso (VCU).40
- Tabela 4 — Parâmetros dos sub-modelos de emissão de folhas e da fenologia no modelo SimulArroz calibrados para três híbridos de arroz. $LAR_{máx1,2}$ = a taxa máxima de aparecimento da primeira e segunda folhas (folhas dia^{-1}), $TTTEM$ = soma térmica total necessária para completar a fase: Emergência - Diferenciação da panícula, $TTTRP$ = soma térmica total necessária para completar a fase: Diferenciação da panícula – Antese, $TTTEG$ = soma térmica total necessária para completar a fase: Antese - Maturação Fisiológica.52
- Tabela 5 — Parâmetros dos sub-modelos de matéria seca e produtividade no modelo SimulArroz para três cultivares híbridas de arroz. RUE é a eficiência do uso da radiação ($g MJ^{-1}$), $SOCF$ é fator de formação das espiguetas (espiguetas/ gMS), $P_{máx}$ é o peso máximo de um grão (g).54
- Tabela 6 — Parâmetros do sub-modelo de partição de matéria seca do modelo SimulArroz calibrados para três híbridos e uma cultivar convencional de arroz. DVS = estágio de desenvolvimento da cultura do arroz irrigado, F = Folhas, C = Colmos, G = Grãos.54
- Tabela 7 — Estatísticas do desempenho do modelo SimulArroz em simular o Estádio de Haun de três híbridos e uma cultivar convencional (IRGA 424) de arroz irrigado em quatro locais do Rio Grande do Sul durante o ano agrícola 2014/2015.56
- Tabela 8 — Estatísticas do desempenho do modelo SimulArroz em simular a data de emergência (EM), diferenciação da panícula (R1), antese (R4), e maturação

fisiológica (R9) de três híbridos e uma cultivar convencional (IRGA 424) de arroz irrigado em quatro locais do Rio Grande do Sul durante o ano agrícola 2014/2015.....57

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 — Mapa do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil, com os locais onde foram conduzidos os experimentos de campo de arroz irrigado durante os anos agrícolas 2013/2014 em Santa Maria e os ensaios de Valor de Cultivo e Uso (VCU) durante o ano agrícola 2014/2015 nas estações regionais de pesquisa do Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA) em Santa Vitória do Palmar, Uruguaiana, Cachoeira do Sul, Camaquã, Bagé, Cachoeirinha e Santa Maria. Os círculos indicam os locais que só foram usados dados de emissão de folhas fenologia (Santa Vitória do Palmar e Uruguaiana) e produtividade. Os triângulos os locais com dados de emissão de folhas, fenologia, matéria seca e produtividade.....37
- Figura 2 — Fluxograma com os processos de crescimento e desenvolvimento na cultura do arroz simulados no modelo SimulArroz.....44
- Figura 3 — Calibração do sub-modelo de emissão de folhas (Estádio de Haun) no colmo principal no modelo SimulArroz para três híbridos de arroz, em Santa Maria no ano agrícola 2013/2014 para as cultivares híbridas QM 1010 CL (a) e INOV CL (b) e em Uruguaiana no ano agrícola 2014/2015 para a cultivar híbrida PRIME CL (c). $LAR_{máx1,2}$ = taxa máxima de aparecimento da primeira e segunda folhas (folhas dia⁻¹).53
- Figura 4 — (a) Número de folhas no colmo principal (HS), (b) número final de folhas no colmo principal (NFF) e (c) dias após a semeadura (DAS) dos estádios emergência (EM), diferenciação da panícula (R1), antese (R4) e maturidade fisiológica (R9) observado e simulado com o modelo SimulArroz para três híbridos (PRIME CL, INOV CL e QM 1010 CL) e uma cultivar convencional (IRGA 424) de arroz irrigado no Rio Grande do Sul no ano agrícola 2014/2015. Os dados dos quatro locais (Santa Maria, Cachoeirinha, Uruguaiana e Santa Vitória do Palmar) estão juntos. Os gráficos inseridos em cada painel são os resíduos (simulado-observado) versus os valores observados.59
- Figura 5 — Duração do ciclo de desenvolvimento (Semeadura até R9) em três cultivares híbridas de arroz irrigado (INOV CL, PRIME CL e QM 1010 CL) em quatro datas de semeadura (25/09/2014, 25/10/2014, 25/11/2014 e 25/12/2014) em

- Santa Maria (a), Cachoeirinha (b), Uruguaiiana (c) e Santa Vitória do Palmar (d), RS, simuladas com o modelo SimulArroz. 61
- Figura 6 — (a) e (e) Matéria seca total da parte aérea, (b) e (f) matéria seca de folhas, (c) e (g) matéria seca de colmos, (d) e (h) matéria seca de folhas senescêntes, (i) Produtividade observado e simulado com o modelo SimulArroz para a cultivar híbrida QM 1010 CL (a, b, c, d, i) e para a cultivar convencional IRGA 424 (e, f, g, h, i) de arroz irrigado no Rio Grande do Sul no ano agrícola 2013/2014 em Santa Maria. Os gráficos inseridos em cada painel são os resíduos (simulado-observado) versus os valores observados. 63
- Figura 7 — Valores observados e simulados pelo modelo SimulArroz do índice de área foliar (IAF) para híbrido QM 1010 CL (d) e para a cultivar convencional IRGA 424 (a) no ano agrícola 2013/2014 em Santa Maria e para os três híbridos de arroz QM 1010 CL (f), INOV CL (g), PRIME CL (e) e para a cultivar convencional IRGA 424 (b) e (c) no ano agrícola 2014/2015 em Cachoeirinha, Rio Grande do Sul. A área foliar específica (ha kg^{-1} folha) (h) para os três híbridos e para uma cultivar convencional (IRGA 424) no Rio Grande do Sul, nos anos agrícolas 2013/14 em Santa Maria e 2014/15 em Cachoeirinha estão juntas no mesmo painel. 65
- Figura 8 — Produtividade simulada de três híbridos (QM 1010 CL, INOV CL e PRIME CL) e uma cultivar convencional (IRGA 424), observado e simulado pelo modelo SimulArroz e observada em Santa Vitória do Palmar, Uruguaiiana, Cachoeirinha, Cachoeira do Sul, Camaquã, Bagé e Santa Maria. Os dados observados foram de experimentos e VCUs, em cinco anos agrícolas (2010/2011, 2011/2012, 2012/2013, 2013/2014 e 2014/2015). Os dados simulados são no nível potencial (a) e alto (b) do SimulArroz. 67
- Figura 9 — Efeito de cultivar (a), de datas de semeadura (b), de local (c) e de ano (d) sobre a produtividade de grãos a 13% de umidade simulado pelo modelo SimulArroz utilizando três cultivares híbridas (QM 1010 CL, INOV CL e PRIME CL), a média delas e uma cultivar convencional (IRGA 424) em sete locais (Santa Vitória do Palmar, Uruguaiiana, Cachoeirinha, Cachoeira do Sul, Camaquã, Bagé e Santa Maria), para as datas de semeadura de 21/09, 31/10 e 10/12 em 5 anos agrícolas (2010/2011, 2011/2012, 2012/2013, 2013/2014 e 2014/2015). 68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Área do solo amostrado (m^2).
AFE	Área foliar específica ($m^2 g^{-1}$ de matéria seca foliar).
b	Coefficiente de sensibilidade com valor de -0,3.
CL	Clearfield®.
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento.
C_{pnult}	Comprimento da penúltima folha.
C_{ult}	Comprimento da última folha.
DLAI	Perda de folhas senescenes e por pragas e doenças ($g m^{-2} dia^{-1}$).
DVS	Estádio de desenvolvimento.
dw	Índice de concordância.
EM	Emergência.
EXP	Expoente.
f(C)	Função de cronologia.
f(CO ₂)	Função de resposta ao CO ₂ .
f(NT)	Função de correção do nível tecnológico da lavoura.
f(T)	Função de resposta da LAR à temperatura do ar.
FC	Fator de correção da RUE em função da temperatura média do ar.
GCROP	Produção total diária de matéria seca ($g m^{-2} dia^{-1}$).
GD	Graus dia ($^{\circ}C dia$)
GLAI	Taxa diária de crescimento de folha ($g m^{-2} dia^{-1}$).
GST	Taxa diária de crescimento de colmo ($g m^{-2} dia^{-1}$).
HS	Número de folhas no colmo principal.
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia.
IRGA	Instituto Rio Grandense do Arroz.
IRRI	International Rice Reserch Institute.
KDF	Coefficiente de extinção da radiação solar no dossel.
LAI	Índice de área foliar.
LALOSS	Perda de folhas senescenes e por pragas e doenças ($g m^{-2} dia^{-1}$).
LAR	Taxa diária de aparecimento de folhas (folhas dia^{-1}).
LAR_{max}	Taxa máxima de aparecimento da primeira e segunda folhas (folhas dia^{-1}).
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento.
MS	Matéria Seca (g).
MTF	Matéria de matéria seca de folhas (g).
NF	Número de folhas expandidas no colmo principal.
NFF	Número final de folhas.
NGP	Número de grãos panícula ⁻¹ .
NP	Número de Panículas m^{-2} .
NP	Número de panículas m^{-2} .
NT	Nível Tecnológico.
\bar{O}	Média dos valores observados.
O_i	Valores observados.
PAR	Radiação fotossinteticamente ativa ($g m^{-2} MJ^{-1} dia^{-1}$).
PARCIAL	Peso parcial (g).
PESO1	Peso de 1 grão (g).
PG	Peso de grão (g).
Pmax	Peso máximo de 1 grão (g).

PMG	Peso de mil grãos.
Prod	Produtividade em Mg ha ⁻¹ .
r	Coefficiente de correlação de Pearson.
R1	Diferenciação da panícula.
R4	Antese.
R9	Maturidade completa dos grãos na panícula.
RLAI	Taxa diária de crescimento da LAI.
RQME	Raiz do quadrado médio do erro.
RQME _n	Raiz do quadrado médio do erro normalizado.
RS	Rio Grande do Sul.
RUE	Eficiência do uso de radiação.
S	Média dos valores simulados.
S _i	Valores simulados.
SLA	Área foliar específica em m ² g ⁻¹ .
SOCF	Fator de formação das espiguetas (espiguetas/gMS).
T	Temperatura do ar (°C).
T _b	Temperaturas cardinal basal inferior (°C).
T _{max}	Temperatura máxima (°C).
T _{med}	Temperatura média diária do ar (°C).
T _{min}	Temperatura mínima (°C).
T _{ot}	Temperatura cardinal ótima (°C).
TOTALG	Soma do número de grãos (grãos m ⁻²).
TTa	Tempo térmico diário acumulado (°C dia).
TTT	Tempo térmico total (°C dia).
TTTEG	Estimativa de TTT da da antese até a maturidade fisiológica.
TTTEM	Estimativa de TTT da sementeira até a emergência.
TTTRP	Estimativa de TTT da diferenciação da panícula até a antese.
TTTVG	Estimativa de TTT da emergência até a diferenciação da panícula .
UFMS	Universidade Federal de Santa Maria.
VCUs	Valor de cultivo e uso.
WA	Wild abortive.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	31
1.1	OBJETIVOS	32
1.1.1	Objetivo geral	32
1.1.2	Objetivo específico	32
1.2	JUSTIFICATIVA	32
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	33
2.1	A CULTURA DO ARROZ	33
2.2	IMPORTÂNCIA DO ARROZ HÍBRIDO	34
2.3	MODELAGEM NA AGRICULTURA.....	35
3	MATERIAIS E MÉTODOS	36
3.1	EXPERIMENTO DE CAMPO	36
3.2	O MODELO SIMULARROZ	42
3.2.1.	Descrição do modelo SimulArroz	42
3.2.2	Calibração do modelo	44
3.2.2.1	<i>Emissão de folhas e fenologia</i>	44
3.2.2.2	<i>Crescimento e produtividade de grãos</i>	45
3.2.2.2.1	Eficiência do uso da radiação.....	46
3.2.2.2.2	Partição da matéria seca.....	46
3.2.2.2.3	Componentes de produtividade.....	47
3.2.3	Avaliação do modelo (dados independentes)	49
3.2.3.1	<i>Emissão de folhas e fenologia</i>	49
3.2.3.2	<i>Crescimento</i>	49
3.2.3.3	<i>Produtividade</i>	50
3.2.3.4	<i>Estatísticas para avaliar o desempenho do modelo</i>	50
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
4.1	CALIBRAÇÃO DO MODELO	51
4.2	AVALIAÇÃO DO MODELO.....	55
5	CONCLUSÃO	69
6	REFERÊNCIAS	70

1 INTRODUÇÃO

O arroz (*Oryza sativa L.*) é o segundo cereal mais produzido no mundo e o Brasil é o sexto maior exportador e o nono maior produtor mundial. O cultivo do arroz no sistema irrigado por inundação praticado na região Sul do Brasil contribui, em média, com 54% da produção nacional, sendo o Estado do Rio Grande do Sul (RS) o maior produtor brasileiro com uma área em torno de 1,1 milhão de hectares (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA PECUÁRIA E ABASTECIMENTO, 2015).

A principal diferença entre o arroz convencional e o arroz híbrido é a heterose ou vigor híbrido, explorada a partir de 1970 em estudos no International Rice Research Institute (IRRI) (INTERNATIONAL RICE RESEARCH INSTITUTE, 1988). A heterose em arroz é geralmente expressa em caracteres quantitativos como produtividade de grãos, peso de grãos, estatura de plantas, número de panículas por planta, número de grãos por panícula entre outros, o que permitiu atingir produtividades 20 a 30% maiores que nas cultivares convencionais, sendo assim, uma ferramenta importante para diminuir a lacuna de produtividade existente entre a média das lavouras de arroz no RS e a produtividade potencial da cultura (COIMBRA et al., 2006; LI; YUAN 2000).

Na área agrícola, modelos matemáticos estão sendo cada vez mais utilizados em diversos cultivos agrícolas como: na soja, no milho, na mandioca, no arroz, entre outros, pois são ferramentas de baixo custo que permitem descrever as complexas interações genótipo-ambiente (SENTELHAS et al., 2015). No Brasil, o uso de modelos de simulação de crescimento, desenvolvimento e produtividade está sendo cada vez mais frequente na literatura (GABRIEL et al., 2014; MARCANTE et al., 2010; ROSA et al., 2015; SENTELHAS et al., 2015; STEINMETZ et al., 2015).

O modelo SimulArroz calcula os processos de crescimento através do acúmulo de matéria seca nos diferentes órgãos da planta, que fundamentalmente determinam a produtividade de cultura (ROSA et al., 2015). Este modelo requer dados de entrada facilmente disponíveis pelas estações meteorológicas automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). O SimulArroz tem como propósito auxiliar agricultores a decidir o manejo a ser aplicado, servir como ferramenta aos professores para facilitar o ensino de processos ecofisiológicos que ocorrem na planta, e realizar acompanhamento da safra para o Rio Grande do Sul.

Na atual versão do SimulArroz (versão 1.0) não existe a opção de simulação para cultivares híbridas de arroz, o que é uma limitação, pois no Rio Grande do Sul o arroz híbrido é cultivado desde 2002, em uma área de aproximadamente 68 mil ha (INSTITUTO RIO GRANDENSE DO ARROZ, 2015), com perspectivas de aumentar seu cultivo nos próximos anos.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Aumentar a faixa de aplicação do SimulArroz como simulador da cultura de arroz no Rio Grande do Sul através da introdução de cultivares híbridas.

1.1.2 Objetivo específico

Calibrar e avaliar o desempenho do modelo SimulArroz em simular o número de folhas, fenologia, matéria seca e a produtividade de três cultivares de arroz híbrido no Rio Grande do Sul.

1.2 JUSTIFICATIVA

Na área agrícola, modelos matemáticos são ferramentas cada vez mais usadas e disponíveis. Os modelos matemáticos de simulação das culturas são uma simplificação da realidade que permite a descrição e estudo dos agroecossistemas (STRECK; ALBERTO, 2006). Uma característica marcante nos modelos agrícolas é que contém coeficientes genéticos, os quais representam as diferenças genótípicas entre as cultivares da cultura. Estes coeficientes genéticos devem ser revisados sempre que há mudanças nas cultivares usadas pelos agricultores.

Como nas culturas agrícolas, inclusive no arroz, a cada ano são lançadas novas cultivares no mercado, os modelos agrícolas necessitam ser testados com as novas cultivares e, em havendo necessidade, o que ocorre quando o modelo não captura a dinâmica do crescimento e desenvolvimento destas novas cultivares, o modelo deve ser calibrado para estas novas cultivares através do ajuste dos coeficientes genéticos. No caso do modelo SimulArroz, a versão atual (versão 1.0) não tem disponível ao usuário a opção de cultivar de

arroz híbrido, devendo-se, portanto, investir em tornar esta opção disponível, de modo a tornar o modelo mais atual e completo.

Com o modelo SimulArroz mais completo, esta ferramenta computacional aumentará sua aplicabilidade como simulador de arroz para o Rio Grande do Sul, contribuindo, assim, para a inovação tecnológica e disponibilidade de um produto mais completo para tomadores de decisão ligadas à cadeia produtiva do arroz no Estado. Na área acadêmica e educacional, a melhora na qualidade e representatividade de ferramentas modernas aumenta a eficiência e o alcance do processo ensino-aprendizagem, contribuindo, assim, para a melhoria da formação dos egressos e futuros profissionais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A CULTURA DO ARROZ

O arroz (*Oryza sativa L.*) é uma planta aquática megatérmica, de cultivo anual, porte ereto, com altura que varia entre 60 e 150 cm, pertencente a subfamília Oryzoideae, tribo Oryzeae, gênero *Oryza* (BOLDRINI; LONGHI-WAGNER; BOECHAT, 2005). Devido a ampla adaptabilidade, o arroz é produzido em latitudes que variam de 50°N (Checoslováquia) a 35°S (Uruguai), desde o nível do mar até em elevadas altitudes (2000 m de altitude no Nepal) (CASTRO et al., 1987).

A produção mundial de arroz é de aproximadamente 746,7 milhão de toneladas do grão em casca, produzidos em uma área de 158 milhão de hectares, correspondente a 29% da produção total de grãos utilizados na alimentação humana (SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO, 2014). O volume da produção compõe a base alimentar de mais de três bilhões de pessoas, com papel fundamental para a segurança alimentar mundial (SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO, 2014). Apesar disso, o comércio internacional é pequeno, pois o maior consumo e a maior produção de arroz estão localizados no continente asiático (aproximadamente 90%).

O Brasil conta com uma produção total de arroz que oscila entre 11 e 13 milhão de toneladas por ano. Segundo a SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO (2014), a produção da região Sul (Paraná, Rio Grande do Sul e Santa Catarina) corresponde a 77% da produção de arroz, sendo o Estado do Rio Grande do Sul o maior produtor, com estimativa de produtividade na safra 2015/16 de 7,6 mil quilos por hectare, em 1,1 milhão de

hectares (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2015). Devido ao grande volume produzido pelos estados do sul do Brasil, estes são responsáveis pela estabilidade e suprimento da produção brasileira.

Nos Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina a evolução da produtividade do arroz irrigado se deve principalmente às entidades responsáveis pela pesquisa e experimentação da cultura, para isso foi necessário buscar alternativas para melhorar o potencial produtivo das cultivares. O desenvolvimento de cultivares adaptadas às condições climáticas locais, que atendessem as exigências do mercado só foi possível devido a variabilidade genética, ou seja, maior tolerância aos estresses bióticos e abióticos (MENEZES et al., 2013).

2.2 IMPORTÂNCIA DO ARROZ HÍBRIDO

A primeira variedade de arroz híbrida foi criada por Yuan Longping ao desenvolver a primeira linhagem macho-estéril em 1970 e o sistema de três linhas em 1973. O arroz híbrido é o produto do cruzamento de duas linhagens geneticamente distintas, ou seja, é a utilização da geração F1 para plantio comercial. Os híbridos são resultantes de programas de melhoramento genético vegetal utilizado para muitas culturas, sejam cereais, leguminosas, oleícolas ou ornamentais, e estão sendo utilizados de forma crescente a nível global desde a sua introdução a cerca de 100 anos (RANGEL; GUIMARÃES; NEVES, 1996).

Nos últimos 20 anos, o IRRI (International Rice Research Institute), com o objetivo de garantir a segurança alimentar e proteção ambiental nos países, criou os híbridos de arroz tropicais, para aumentar a produtividade do arroz, com variedades puras de arroz e, também, com variedades de alta produtividade como é o caso das de porte semi-anão. A comercialização de híbridos de arroz nos trópicos começou em 1994 e as sementes híbridas foram produzidas principalmente em programas nacionais tomando como base para a produção as diretrizes fornecidas pelo IRRI e China (VIRMANI, 2003).

A procura de híbridos vem ganhando cada vez mais importância por permitir aos agricultores produzir mais arroz por unidade de área e tempo. Cultivares híbridas de arroz têm sido utilizado em 50% da área de arroz na China e também em cerca de outros 20 países (CANTRELL, 2003). A pesquisa sobre a heterose ou vigor híbrido em arroz somente foi explorada com sucesso a partir da descoberta do citoplasma macho estéril, denominado de WA (wild abortive), que foi descoberto em espécies selvagens (*O. rufipogon* Griff ou *O. sativa* f. *Spontanea*) na ilha de Hainan em 1970. Desde então a área destinada para a produção

de arroz híbrido aumentou de 2,1 milhões de hectares em 1977 para 10,9 milhões de hectares em 1987, para 15,3 milhões de hectares em 1997 e para 52,0 milhões de hectares em 2004 (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, 2016).

A heterose foi primeiramente reportada em 1926 quando foi observado aumento do número de colmos e produtividade em híbridos F1 comparado com os pais. A heterose em arroz geralmente é expressa em caracteres quantitativos como produtividade de grãos, peso de grãos, estatura de plantas, número de panículas por planta, número de grãos por panícula entre outros, o que permitiu que com o uso dessa tecnologia seja possível atingir produtividades 20 a 30% maiores que nas cultivares convencionais (LI;YUAN 2000; COIMBRA et al., 2006).

No Brasil, as sementes de arroz híbrido são produzidas pela RiceTec Sementes. Na safra 2014/2015 a área plantada com cultivares híbridas no Rio Grande do Sul foi aproximadamente 68 mil hectares com perspectivas de aumentar para os próximos anos (INSTITUTO RIO GRANDENSE DO ARROZ, 2015).

2.3 MODELAGEM NA AGRICULTURA

Modelos matemáticos estão sendo cada vez mais utilizados na agricultura, pois são ferramentas de baixo custo operacional que permite descrever as complexas interações nos agroecossistemas (WALTER et al., 2012). Na área agrícola, para ser representativo e confiável, cada modelo matemático precisa ser adaptado e testado em diferentes ambientes. Após testados, com os modelos agrícolas pode-se prever o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade da cultura em função das condições meteorológicas que ocorre em cada estação de crescimento, em diferentes locais (SHIN et al., 2006; SHIN et al., 2010).

Para a cultura do arroz existem modelos dinâmicos de simulação da produtividade de grãos mais complexos, como o CERES-rice (SINGH et al., 1993) e o ORYZA1 (KROPFF; VAN LAAR; MATTHEWS, 1994), e outros menos complexos que estimam a data de ocorrência dos principais estádios de desenvolvimento em função das características da lavoura, localização, data de emergência e cultivar, como o GD Arroz (STEINMETEZ et al., 2015), e o InfoCrop (AGGARWAL et al., 2006), que simula processos de crescimento, desenvolvimento e produtividade de grãos, utilizando uma abordagem mais robusta, com índices ecofisiológicos, como a eficiência de uso de radiação (RUE), e o SimulArroz (STRECK et al. 2013; ROSA et al., 2015) que também simula os processos de crescimento,

desenvolvimento e produtividade de grãos para cultivares de arroz irrigado no Rio Grande do Sul.

O modelo SimulArroz foi testado usando dados experimentais e de lavouras em vários locais do Rio Grande do Sul para onze cultivares, que são: IRGA 421 de ciclo muito precoce, IRGA 416, IRGA 417, BRS Querência de ciclo precoce, IRGA 420, BR-IRGA 409, BRS 7 Taim, IRGA 424, EEA 406 de ciclo médio, Epagri 109 e SCSBRS Tio Taka de ciclo tardio (SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO, 2014) e o modelo captura a diferença de duração de ciclo das cultivares.

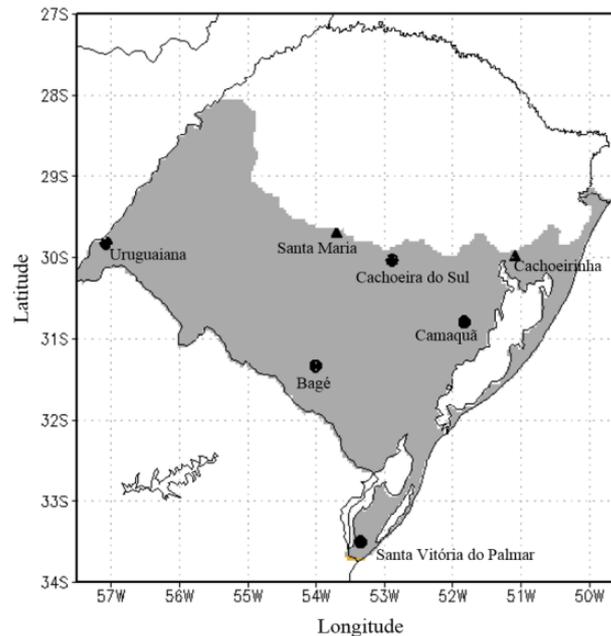
Os modelos de simulação das culturas agrícolas têm coeficientes genéticos, os quais representam as diferenças entre as cultivares e cada cultura, as quais diferem em vários aspectos e variáveis de crescimento e desenvolvimento, como por exemplo capacidade de perfilhamento, arquitetura foliar, tamanho de folhas, índice de área foliar, capacidade fotossintética do dossel e ciclo de desenvolvimento. Na maioria das vezes estes coeficientes genéticos devem ser calibrados para cultivares atualmente usadas (WALTER et al., 2012) e, com o lançamento de novas cultivares no mercado a cada ano, os coeficientes genéticos devem ser revistos e, se necessário, recalibrados. A atual versão do SimulArroz (versão 1.0) tem uma lista de onze cultivares de arroz que podem ser selecionados pelo usuário.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 EXPERIMENTO DE CAMPO

Foram conduzidos experimentos de campo durante o ano agrícola 2013/2014, em Santa Maria (29° 72' S, 53° 72' W e altitude de 103 m), e no ano agrícola 2014/2015, em Santa Maria e nas estações de pesquisa do Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA) de Cachoeirinha (29° 57' S, 51° 5' W, e altitude 17 m), Santa Vitória do Palmar (33° 51' S, 53° 35' W, e altitude 24 m), Uruguaiana (29° 83' S, 57° 08' W, e altitude 74 m), Bagé (31° 34' S, 54° 01' W, e altitude 226 m), Camaquã (30° 80' S, 51° 83' W, e altitude 92 m) e Cachoeira do Sul (30° 02' S, 52° 53' W, e altitude 68 m). Estes sete locais representam as condições edafoclimáticas da área de cultivo de arroz irrigado no RS (Figura 1).

Figura 1 — Mapa do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil, com os locais onde foram conduzidos os experimentos de campo de arroz irrigado durante os anos agrícolas 2013/2014 em Santa Maria e os ensaios de Valor de Cultivo e Uso (VCU) durante o ano agrícola 2014/2015 nas estações regionais de pesquisa do Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA) em Santa Vitória do Palmar, Uruguaiiana, Cachoeira do Sul, Camaquã, Bagé, Cachoeirinha e Santa Maria. Os círculos indicam os locais que só foram usados dados de emissão de folhas fenologia (Santa Vitória do Palmar e Uruguaiiana) e produtividade. Os triângulos os locais com dados de emissão de folhas, fenologia, matéria seca e produtividade.



Fonte: Jossana Ceolin Cera.

Foram realizadas uma data de semeadura no ano agrícola 2013/2014, e quatro no ano agrícola 2014/2015 (Tabela 1), variando de 21 de outubro a 3 de dezembro, abrangendo o período recomendado para a semeadura de arroz no RS que vai desde início de setembro até meados de dezembro, dependendo da região orizícola (SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO, 2014).

Tabela 1 — Híbridos de arroz, locais e datas de semeadura dos experimentos de arroz irrigado por inundação usados para a calibração e para a avaliação (dados independentes) dos sub-modelos de emissão de folhas e da fenologia no modelo SimulArroz no Rio Grande do Sul.

HÍBRIDO ⁽¹⁾	CALIBRAÇÃO		AVALIAÇÃO	
	LOCAL	DATA DE SEMEADURA	LOCAL	DATA DE SEMEADURA
PRIME CL	Uruguaiana	24/10/2014	Santa Vitória do Palmar	21/10/2014
			Cachoeirinha	27/10/2014
INOV CL	Santa Maria	03/12/2013	Santa Maria	28/10/2014
			Santa Vitória do Palmar	21/10/2014
			Cachoeirinha	27/10/2014
QM 1010 CL	Santa Maria	03/12/2013	Santa Maria	28/10/2014
			Santa Vitória do Palmar	21/10/2014
			Cachoeirinha	27/10/2014

⁽¹⁾INOV CL e PRIME CL = ciclo precoce (106 a 120 dias); QM 1010 CL = ciclo médio (121 a 135 dias).

Fonte: A autora.

As três cultivares de arroz híbrido são representativas das cultivares híbridas, do grupo Precoce (‘PRIME CL’ e ‘INOV CL’) e médio (‘QM 1010 CL’) usadas no Rio Grande do Sul atualmente (SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO, 2014). A densidade de semeadura foi de 40 kg/ha para os híbridos ‘PRIME CL’ e ‘QM 1010 CL’ e de 50 kg/ha para o ‘INOV CL’, pela característica de perfilhar menos que os outros dois híbridos (PESKE; SCHUCH; BARROS, 2004). Além dos híbridos, em todos os experimentos foi utilizada também a cultivar IRGA 424, convencional, para fins de comparação (testemunha). No experimento em Cachoeirinha no ano agrícola 2014/2015, o IRGA 424 foi cultivado em duas densidades de semeadura (40 kg/ha e 100 kg/ha). A cultivar IRGA 424 foi usada pois é indicada para as todas as regiões orizícolas do RS (SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO, 2014), inclusive onde é comum a ocorrência de temperaturas mais baixas, pois é adaptável ao frio, e por ter maior produtividade potencial e aceitável qualidade de grãos, representando a maior área plantada no Estado dentre as cultivares convencionais não CL (Clearfield[®]) sendo, por isso, usadas nos ensaios de avaliação de cultivares híbridas

como cultivar testemunha (SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO, 2014).

Os experimentos utilizados na calibração do modelo para a emissão de folhas e fenologia são os apresentados na Tabela 1 e para o crescimento, ou seja, MS total da parte aérea, de folhas, de colmos e de folhas senescentes e produtividade das três cultivares híbridas são os descritos nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2 — Híbridos de arroz, locais e datas de semeadura dos experimentos de arroz irrigado por inundação usados para a calibração e para a avaliação (dados independentes) do sub-modelo de matéria seca no modelo SimulArroz no Rio Grande do Sul.

HÍBRIDOS	CALIBRAÇÃO		AVALIAÇÃO	
	LOCAL	DATA DE SEMEADURA	LOCAL	DATA DE SEMEADURA
QM 1010 CL	Cachoeirinha	27/10/2014	Santa Maria	03/12/2013
INOV CL	Cachoeirinha	27/10/2014		
PRIME CL	Cachoeirinha	27/10/2014		

Fonte: A autora.

Tabela 3 — Híbridos de arroz, locais e datas de semeadura dos experimentos de arroz irrigado por inundação usados para a calibração e para a avaliação (dados independentes) do sub-modelo da produtividade no modelo SimulArroz no Rio Grande do Sul. Os dados independentes são de ensaios de Valor de Cultivo e Uso (VCU).

HÍBRIDOS	CALIBRAÇÃO		AVALIAÇÃO	
	LOCAL	DATA DE SEMEADURA	LOCAL	DATA DE SEMEADURA
INOV CL	Cachoeirinha	27/10/2014	Cachoeirinha	22/10/10, 21/10/11
			Santa Vitória do Palmar	27/10/10, 4/11/11
			Uruguaiana	26/10/10, 21/10/11
			Camaquã	01/11/2011
			Cachoeira do Sul	19/11/2011
			Santa Maria	25/10/13
PRIME CL	Cachoeirinha	27/10/2014	Cachoeirinha	25/10/12, 09/11/13
			Santa Vitória do Palmar	18/10/12, 24/10/13, 21/10/14
			Uruguaiana	19/10/12, 30/10/13, 24/10/14
			Bagé	28/10/14
			Camaquã	26/10/12, 31/10/13, 11/11/14
			Cachoeira do Sul	18/10/12, 18/10/13, 27/10/14
			Santa Maria	25/10/2013
QM 1010 CL	Santa Maria	25/10/2014	Cachoeirinha	21/10/11, 25/10/12, 09/11/13, 27/10/14
			Santa Vitória do Palmar	4/11/11, 18/10/12, 24/10/13, 21/10/14
			Uruguaiana	21/10/11, 19/10/12, 30/10/13, 24/10/14
			Bagé	28/10/14
			Camaquã	01/11/2014, 26/10/12, 31/10/13, 11/11/14
			Cachoeira do Sul	19/11/11, 18/10/12, 18/10/13, 27/10/14
			Santa Maria	25/10/2013

Fonte: A autora.

O espaçamento entre linhas em todos os locais foi de 0,17 m. O tamanho da parcela para cada cultivar foi de 17 m x 17 m em Santa Maria, 1,57 m x 47,0 m em Cachoeirinha, 1,53 m x 5 m em Santa Vitória do Palmar e em Uruguaiana. A adubação e os tratamentos

fitossanitários foram realizados conforme as indicações técnicas para a cultura (SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO, 2014).

O delineamento experimental em Santa Vitória do Palmar e Uruguaiiana foi de blocos ao acaso com 5 e 4 repetições, respectivamente. Em Santa Maria e Cachoeirinha não houve delineamento experimental e foram realizadas as amostragens em uma parcela de 17 m x 17 m e 1,57 x 47,0 m, respectivamente, conforme a metodologia usada em GABRIEL et al. (2014).

A data de emergência foi considerada quando 50% das plantas estavam visíveis na superfície do solo. Um total de 339 plantas (75 plantas em Santa Vitória do Palmar, 120 plantas em Cachoeirinha, 72 plantas em Uruguaiiana e 72 plantas em Santa Maria), foram marcadas uma semana após a emergência com arames coloridos no centro das parcelas. Nas plantas marcadas, foi determinado semanalmente, em Santa Maria, ou a cada 3 – 4 semanas nos outros locais, o número de folhas no colmo principal através da escala de Haun, HS (HAUN, 1973), que é calculado por:

$$HS = NF + C_{ult}/C_{pnult} \quad (1)$$

em que HS é o número de folhas no colmo principal (Escala de Haun), NF é o número de folhas expandidas no colmo principal, Cult é o comprimento da última folha (sem o colar formado) e Cpnult é o comprimento da penúltima folha (última com o colar formado), ambos em centímetros (cm).

Nas plantas marcadas também foram observadas as datas em que 50% das plantas estavam em antese (R4) e em maturidade fisiológica (R9), segundo a escala de COUNCE; KEISLING; MITCHELL (2000). A data de diferenciação da panícula (R1) foi determinada por amostragem destrutiva de 10 plantas na parcela de acordo com a metodologia da SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO (2014), e a data de R9 foi quando no mínimo 50% das plantas amostradas estavam neste estágio de desenvolvimento.

Para a determinação da MS total da parte aérea, as parcelas foram divididas em quatro quadrantes e em cada quadrante foi coletado a MS total da parte aérea (folhas verdes, colmos, folhas senescentes e panículas), em 3 linhas de 1,0 m de comprimento, totalizando 0,51 m² de área amostrada. As plantas foram cortadas ao nível do solo e posteriormente foi realizada a separação dos compartimentos, armazenagem e secagem em estufa sob ventilação

forçada a 60°C até a estabilização do peso do material, sendo pesado em uma balança de precisão (0,001g).

O índice de área foliar (LAI) foi calculado por:

$$LAI = AFE \times MTF / A \quad (2)$$

em que AFE é a área foliar específica ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$ de matéria seca foliar) que foi determinada através da relação entre área de 20 folhas verdes (m^2) e sua matéria seca (g), MTF é a matéria de matéria seca de folhas (g) e A é a área do solo amostrado (m^2).

Nos Valores de Cultivos e Usos (VCUs) (Figura 1) a produtividade dos grãos foi calculada através da colheita de uma área de 5m^2 . Já nos outros experimentos de campo a produtividade dos grãos foi estimada a partir dos componentes de produtividade (nº de panículas m^{-2} , nº de grãos panícula⁻¹ e peso de mil grãos), para tanto, foi contado o número de panículas em 1m^2 , coletadas 15 panículas aleatoriamente para a contagem do número de grãos panícula⁻¹ e, posteriormente, foi realizada a seleção de mil grãos, descartando-se os abortados e com danos ocasionados pelo ataque de pragas ou doenças. O material foi seco em estufa de circulação forçada até o peso constante. A partir dos componentes de produtividade foi realizada a estimativa da produtividade em g m^{-2} .

$$\text{Prod} = \text{NP} \cdot \text{NGP} \cdot \left(\frac{\text{PMG}}{1000}\right) \quad (3)$$

em que NP é o número de panículas m^{-2} , NGP é o número de grãos panícula⁻¹ e o PMG é o peso de mil grãos em gramas. A produtividade foi convertida para Mg ha^{-1} .

3.2 O MODELO SIMULARROZ

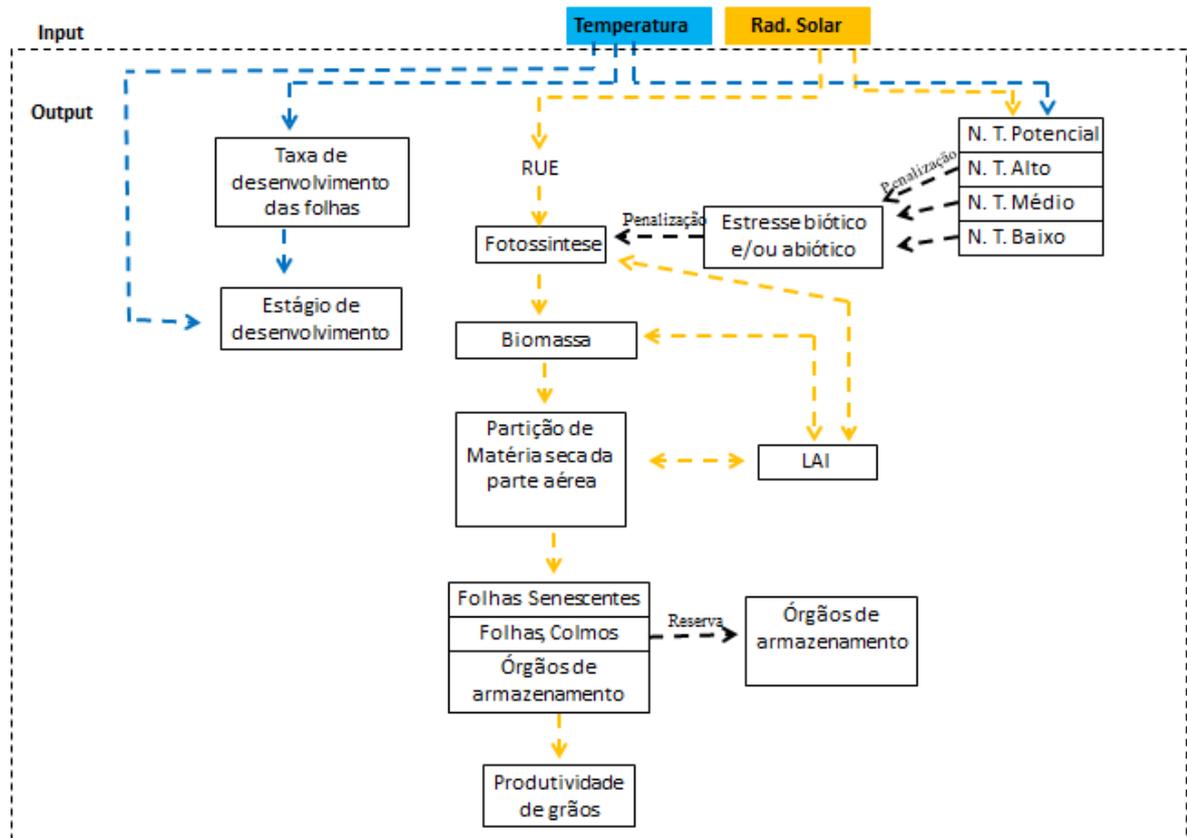
3.2.1. Descrição do modelo SimulArroz

O SimulArroz necessita de dados de entrada para ser rodado (inputs) que são os dados meteorológicos. Os dados meteorológicos são temperatura mínima e máxima diária do ar (°C) e radiação solar ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$), as quais devem ser fornecidos em um arquivo de entrada no formato *.txt.

O modelo utiliza a temperatura do ar, tempo térmico (°C dia), para a simulação do desenvolvimento da cultura do arroz, de modo que a duração de cada uma das fases é definida pelo tempo térmico necessário para completar cada fase (Figura 2) No SimulArroz, não é considerado o efeito do fotoperíodo sobre o desenvolvimento, pois a maioria das cultivares de arroz usadas no Rio Grande do Sul tem pouca ou desprezível sensibilidade ao fotoperíodo.

A necessidade de radiação solar é diferente entre os estádios de desenvolvimento do arroz. No estágio inicial a planta de arroz necessita de pouca radiação solar. A fase vegetativa apresenta uma baixa resposta à radiação solar. Com o avanço no desenvolvimento, a necessidade de radiação solar aumenta progressivamente. A produção de Matéria Seca (MS) no SimulArroz é calculada a partir da Eficiência do Uso da Radiação (RUE) e do Índice de Área Foliar (LAI). A abordagem da fotossíntese baseada em RUE é amplamente utilizada em modelos de simulação de culturas (incluindo o modelo SimulArroz) como um substituto para simplificar as complexas abordagens bioquímicas da fotossíntese. Normalmente, elevadas produtividades estão associados a um bom aporte fotossintético da planta (sem e/ou quase nada de estresse biótico ou abiótico), o que significa que a cultura precisa produzir uma quantidade de biomatéria considerável, dando condições para que a formação e o enchimento de grãos sejam elevados (Figura 2).

Figura 2 — Fluxograma com os processos de crescimento e desenvolvimento na cultura do arroz simulados no modelo SimulArroz.



Fonte: A autora.

3.2.2 Calibração do modelo

3.2.2.1 Emissão de folhas e fenologia

A versão 1.0 do SimulArroz (disponível em www.ufsm.br/simularroz) foi usada neste estudo para introdução da genética de arroz híbrido. As modificações que foram introduzidas são nos sub-modelos que calculam a emissão diária de folhas no colmo principal e na fenologia das três cultivares híbridas.

A taxa diária de emissão de folhas no colmo principal no SimulArroz é calculada por STRECK et al. (2003):

$$LAR = LAR_{máx1,2} f(T)f(C) \quad (4)$$

em que LAR é a taxa diária de aparecimento de folhas (folhas dia⁻¹), LAR_{máx1,2} é a taxa máxima de aparecimento da primeira e segunda folhas (folhas dia⁻¹), f(T) é a função de resposta da LAR à temperatura do ar e f(C) é a função de cronologia que faz decrescer a LAR a partir da terceira folha.

A f(T) é uma versão da função beta:

$$f(T) = [2(T - T_b)^\alpha (T_{ot} - T_b)^\alpha - (T - T_b)^{2\alpha}] / (T_{ot} - T_b)^{2\alpha} \quad (5)$$

para $T_b \leq T \leq T_{máx}$

$$f(T) = 0$$

para $T < T_b$ ou $T > T_{máx}$

$$\alpha = \ln 2 / \ln [(T_{máx} - T_b) / (T_{ot} - T_b)] \quad (6)$$

em que T_b , T_{ot} , e $T_{máx}$ são as temperaturas cardinais (base, ótima e máxima, respectivamente) para LAR, e T é a temperatura média diária do ar (°C). As temperaturas cardinais de emissão de folhas são 11°C (ELLIS; QI; SUMMERFIELD, 1993; INFELD; SILVA; ASSIS, 1998), 26°C (ELLIS; QI; SUMMERFIELD, 1993) e 40°C (GAO et al., 1992), respectivamente.

A função de cronologia f(C) é dada por:

$$f(T) = 1 \quad \text{se } HS < 2 \quad (7)$$

$$f(C) = HS / 2^b \quad \text{se } HS \geq 2 \quad (8)$$

em que HS é o Estádio de Haun e b é o coeficiente de sensibilidade com valor de -0,3 (STRECK et al., 2003).

O número de folhas acumulado no colmo principal, representado pela escala de Haun, é calculado por:

$$HS = \sum LAR \quad (9)$$

em que HS é o Estádio de Haun (folhas no colmo principal).

Para o cálculo do progresso da fenologia no SimulArroz, o estágio de desenvolvimento (DVS), foi utilizada a equação:

$$DVS = TTa / TTT \quad (10)$$

em que TTa é o tempo térmico diário acumulado (°C dia) e TTT é o tempo térmico total (°C dia) para completar a fase.

O TTa é calculado por (STRECK et al., 2007):

$$TTa = (T - T_b) 1dia \quad (11)$$

quando $T_b < T \leq T_{ot}$ e se $T < T_b$ então $T = T_b$

$$TTa = [(T_{ot} - T_b) (T_{máx} - T) / (T_{máx} - T_{ot})] 1dia$$

quando $T_{ot} < T \leq T_{máx}$, e se $T > T_{máx}$ então $T = T_{máx}$

em que T_b , T_{ot} , e T_{max} são as temperaturas cardinais base (11°C), ótima (30°C) e máxima (40°C) de desenvolvimento do arroz e T é a temperatura média diária do ar calculada pela média aritmética entre as temperaturas mínima e máxima diária do ar. O TTT é calculado por:

$$TTT = \sum TTa \quad (12)$$

o modelo Simularroz descreve a fenologia a partir da escala: DVS -1 na semeadura, zero na emergência, 0,65 na diferenciação da panícula (R1), 1 na antese (R4) e 2 na maturidade fisiológica (R9).

A calibração dos dois sub-modelos consistiu em estimar o valor de $LAR_{máx1,2}$ (equação 4) e o valor de TTT (equação 12) para cada híbrido, usando dados do experimento em Santa Maria no ano agrícola 2013/14 para os híbridos ‘INOV CL’ e ‘QM 1010 CL’ e em Uruguaiana no ano agrícola 2014/15 para o híbrido ‘PRIME CL’ (Tabela 1). Para a estimativa da $LAR_{máx1,2}$ foi utilizado o método de aumento e diminuição do valor inicial (0,3 folhas dia⁻¹) em 1% até minimizar o erro entre os valores estimados e observados de HS (SAMBORANHA et al., 2013). A estimativa de TTT foi realizada para cada fase de desenvolvimento (da semeadura até a emergência = TTTEM, da emergência até a diferenciação da panícula = TTTVG, diferenciação da panícula até a antese = TTTRP e da antese até a maturidade fisiológica = TTTEG).

3.2.2.2 Crescimento e produtividade de grãos

Para a simulação do crescimento e produtividade do arroz híbrido foi necessário realizar a calibração dos coeficientes genéticos relacionados a MS da parte aérea (folhas, colmos, folhas senescentes e panícula), e da produtividade da cultura.

A calibração dos sub-modelos de crescimento e produtividade consistiu em estimar o valor da RUE e a MS total da parte aérea, de folhas verdes e senescentes, de colmos e de produtividade para cada híbrido (QM 1010 CL, INOV CL, PRIME CL), usando dados do experimento de Cachoeirinha e Santa Maria no ano agrícola 2014/15 (Tabelas 1 e 3). A produtividade no modelo SimulArroz foi estimada para as cultivares ‘INOV CL’ e ‘PRIME CL’ também com dados de Cachoeirinha sendo a cultivar híbrida ‘QM 1010 CL’ calibrada com dados do experimento de VCU do IRGA de Santa Maria como pode ser observado na Tabela 3.

3.2.2.2.1 Eficiência do uso da radiação

O valor da RUE no modelo é de 2,39 g MJ⁻¹ da radiação fotossinteticamente ativa (KINIRY et al., 2001) para as cultivares convencionais de arroz.

A RUE é calculada por:

$$RUE = 2,39 FC f(CO_2) f(NT) \quad (13)$$

em que FC é o fator de correção da RUE em função da temperatura média do ar, $f(CO_2)$ é a função resposta ao CO₂, $f(NT)$ é a função de correção do nível tecnológico da lavoura e o valor de 2,39 é o valor da RUE para as cultivares convencionais de arroz na versão 1.0 do SimulArroz (KINIRY et al., 2001).

O efeito da temperatura sobre a RUE é descrito por uma função de resposta com quatro temperaturas cardinais (SOLTANI et al., 2001), de modo que a RUE é máxima quando a temperatura média diária do ar se situa na faixa ótima (22 a 32°C) e é multiplicada por um fator de correção menor que 1 em temperaturas sub e supra ótimas. A concentração de CO₂ utilizada foi 390 ppm e o modelo foi rodado em nível tecnológico potencial.

3.2.2.2.2 Partição da matéria seca

A produção de MS pela planta de arroz no modelo SimulArroz é calculada a partir da RUE e do LAI. No cálculo da produção diária da MS no modelo SimulArroz utiliza-se a radiação fotossinteticamente ativa como sendo 50% da radiação solar global incidente, em Mj m⁻² dia⁻¹. O modelo considera que o coeficiente de extinção das folhas à radiação solar é de 0,4 até a antese e 0,6 após a antese (BOUMAN et al., 2004). A equação para o cálculo da taxa diária de crescimento da cultura no modelo SimulArroz é (AGGARWAL et al., 2006):

$$GCROP = RUE \times PAR(1 - EXP(-KDF(LAI - PSTPAR))) \quad (14)$$

em que GCROP é a produção total diária de matéria seca (g m⁻² dia⁻¹), RUE é a eficiência do uso da radiação (g m⁻² MJ⁻¹ dia⁻¹), PAR é a radiação fotossinteticamente ativa (g m⁻² MJ⁻¹ dia⁻¹), LAI é o índice de área foliar, PSTPAR é a radiação capturada por pragas e KDF é o coeficiente de extinção da radiação no dossel.

O processo de senescência das folhas e do colmo, no modelo SimulArroz, é calculado pela perda de uma fração do peso acumulado em cada órgão da planta até o momento que a cultura se encontra. A MS diária alocada para as folhas, em g m⁻² dia⁻¹, multiplicada pela área foliar específica (SLA), em m² g⁻¹ (variável em função do estágio de desenvolvimento), permite que o incremento diário em peso das folhas seja transformado em área de folhas, a partir da qual calcula-se o LAI, que é atualizado diariamente e usado no cálculo da produção de matéria seca diária. No primeiro dia de simulação da produção de matéria seca, a área

foliar inicial de uma planta é considerada $0,0001 \text{ m}^2$ (BOUMAN et al., 2004) com densidade de 200 plantas m^{-2} resultando em um LAI inicial de 0,02. Considerou-se que uma parte dos colmos também tem atividade fotossintética, sendo a contribuição dos colmos acrescentada ao valor do LAI.

A taxa diária de crescimento da LAI (RLAI) é calculada no SimulArroz por (AGGARWAL et al., 2006):

$$\text{RLAI} = \text{LAI} + \text{GLAI} + \text{GST} - \text{DLAI} - \text{LALOSS} \quad \text{onde } \text{LAI} = \text{RLAI} \quad (15)$$

em que GLAI é a taxa diária de crescimento de folha ($\text{g m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), GST é a taxa diária de crescimento de colmo ($\text{g m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), DLAI e LALOSS é a perda de folhas senescentes e por pragas e doenças ($\text{g m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), respectivamente.

Depois de calculada a produção de MS total diária na planta o SimulArroz calcula a partição da MS total entre raiz e parte aérea e a fração da parte aérea é distribuída entre os diferentes órgãos da planta (folhas, colmos, folhas senescentes, panícula) conforme o estágio de desenvolvimento que a cultura se encontra de acordo com a escala de COUNCE; KEISLING; MITCHELL (2000).

3.2.2.2.3 Componentes de produtividade

O efeito da radiação solar no período anterior ao estágio de início da floração (R4), sobre o potencial produtivo da cultura depende da disponibilidade de radiação no período, sendo a produtividade afetada por temperaturas extremas que causam esterilidade das espiguetas ou morte da planta, no caso de temperaturas muito baixas. O modelo SimulArroz consegue contabilizar estes danos, pois o número de espiguetas formadas em um dia é calculado por um fator de formação de espiguetas (espiguetas/gMS), em função da matéria seca produzida no dia ($\text{g m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) o que resulta em espiguetas $\text{m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$.

Este valor é acumulado desde a diferenciação da panícula (R1) até a antese (R4) resultando no número total de espiguetas por metro quadrado. Assim, o número final de espiguetas sofre uma correção em função da esterilidade das espiguetas por temperaturas extremas (esterilidade por frio e calor) no período crítico que é no período próximo a antese da planta de arroz. A partir da antese (R4), uma parte da matéria seca produzida começa a ser translocada para a panícula, dando início ao enchimento das espiguetas, formando os grãos. Após a antese, em adição à matéria seca produzida diariamente, 10% das reservas previamente acumuladas no colmo são translocadas para os grãos todos os dias.

O valor atual utilizado pelo modelo SimulArroz para o fator de formação de espiguetas é de 65 espiguetas/gMS, este valor pode sofrer variação dependendo da cultivar, como por exemplo as cultivares híbridas. Desta maneira, o valor de 65 espiguetas/gMS foi calibrado para os híbridos com o objetivo de obter melhor ajuste na produtividade.

Para calcular a produtividade de grãos (g m^{-2}) o modelo SimulArroz utiliza as equações dadas em AGGARWAL et al. (2006):

$$\text{PARCIAL} = \text{PESO1 TOTALG} \quad (16)$$

$$\text{TOTALG} = \text{PARCIAL}/(\text{Pmax}0.25) \quad (17)$$

em que PARCIAL é o peso parcial (g), PESO1 é o peso de 1 grão (g), TOTALG é o soma do número de grãos (grãos m^{-2}), Pmax é o peso máximo de 1 grão (g).

No modelo SimulArroz, quando um quarto (0,25) do período de enchimento de grãos é completado a MS dos grãos é avaliada no modelo e se o peso de 1 grão for menor que um quarto do peso máximo, o número total de grãos é reduzido redistribuindo a MS com o objetivo de que cada grão tenha um quarto do peso máximo.

Embora este procedimento reduza o número de grãos produzidos não penaliza na produtividade final, pois é apenas uma redistribuição da MS dos grãos. Esta é a maneira que o modelo utiliza para controlar o peso individual dos grãos uma vez que este é um componente de produtividade que tem pouca variabilidade. Desta forma, a simulação é finalizada quando a fase de enchimento de grãos se completa (maturidade fisiológica), ou seja, quando o peso máximo dos grãos é alcançado.

Na atual versão do modelo SimulArroz o peso máximo de um grão é igual a 0,0249 gramas, e este valor foi calibrado para as cultivares híbridas. Para isto, foi realizada uma busca no banco de dados do IRGA (VCUs) de experimentos conduzidos em sete locais do Rio Grande do Sul (Figura 1), nos quais foi determinado através do peso de mil grãos o peso máximo de 1 grão para cada um dos híbridos.

3.2.3 Avaliação do modelo (dados independentes)

3.2.3.1 Emissão de folhas e fenologia

A avaliação dos sub-modelos de emissão de folhas e fenologia, foi realizada com dados independentes de HS e data de emergência, R1, R4 e R9 coletados nos experimentos em diferentes locais do RS (Tabela 1 e Figura 1).

Os sub-modelos do SimulArroz também foram rodados com dados independentes para a cultivar IRGA 424, que já está calibrada e faz parte da lista de cultivares na versão 1.0 do SimulArroz. O objetivo de rodar o modelo para uma cultivar já calibrada foi para comparar o desempenho do modelo na simulação dos híbridos com a simulação da cultivar convencional. Os parâmetros dos sub-modelos de emissão de folhas e fenologia para a cultivar IRGA 424 no SimulArroz são: $LAR_{máx1,2}$ 0,347 folhas dia⁻¹, TTTEM = 50,0 °C dia, TTTVG = 644,3 °C dia, TTTRP = 153,0 °C dia, TTTEG = 112,7 °C dia.

3.2.3.2 *Crescimento*

A validação dos sub-modelos de crescimento e produtividade, foi realizada com dados independentes de MS total da parte aérea, de folhas, de colmos, de folhas senescentes e produtividade coletados nos demais experimentos nos diferentes locais que podem ser observados na Tabela 2 e 3 e Figura 1.

Para a avaliação dos sub-modelos de crescimento foram conduzidos experimentos em uma área privada a 18 km de distância da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) para a cultivar convencional IRGA 424 e para o híbrido QM 1010 CL (Tabela 2 e 3). A cultivar PRIME CL não foi semeada neste local, já a cultivar INOV CL apresentou problemas durante o período de condução do experimento que podem estar relacionados ao manejo e fertilidade de solo e, portanto estas cultivares (PRIME CL e INOV CL) não foram testadas pelo modelo.

3.2.3.3 *Produtividade*

Para testar a capacidade do modelo na predição da produtividade de grãos de arroz do modelo SimulArroz com dados independentes, foi realizada uma busca de trabalhos (na literatura e no banco de dados do IRGA) nos quais foi obtida a produtividade de grãos em experimentos conduzidos em sete locais do Rio Grande do Sul em cinco anos agrícolas (2010/2011 a 2014/2015) (Tabela 3). O modelo foi rodado na condição potencial nos cinco anos para os sete locais, nas datas de semeadura observadas para cada local, que variaram de 18 de outubro a 19 de novembro. Os dados meteorológicos diários (temperatura mínima e máxima do ar e radiação solar), necessários para rodar o SimulArroz em cada local, foram obtidos de estações meteorológicas do INMET do município ou mais próximo a este.

3.2.3.4 *Estatísticas para avaliar o desempenho do modelo*

O desempenho dos sub-modelos no SimulArroz foi avaliado pelas estatísticas: raiz do quadrado médio do erro (RQME), raiz do quadrado médio do erro normalizado (RQME_n), índice “BIAS”, índice de concordância (dw) e coeficiente de correlação de Pearson (r).

O “RQME” expressa o erro médio do modelo (quanto menor o RQME melhor é o modelo) e é calculado por (JANSSEN; HEUBERGER, 1995):

$$RQME = \left[\frac{\sum (s_i - o_i)^2}{n} \right]^{0,5} \quad (18)$$

em que S_i são os valores simulados, O_i são os valores observados e n é o número de observações.

O RQME normalizado foi calculado por (JANSSEN; HEUBERGER, 1995):

$$RQME_n = 100. RQME / \bar{O} \quad (19)$$

em que \bar{O} é a média dos valores observados.

O valor de “BIAS”, foi calculado por (SAMBORANHA et al., 2013):

$$BIAS = \frac{\sum s_i - \sum o_i}{\sum o_i} \quad (20)$$

O índice “dw” foi calculado por (BORGES; MENDIONDO, 2007, SAMBORANHA et al., 2013):

$$d_w = 1 - \frac{\sum (s_i - o_i)^2}{[(\sum |s_i - \bar{o}|) + (\sum |o_i - \bar{o}|)]^2} \quad (21)$$

O valor de r foi calculado por (BORGES; MENDIONDO, 2007, SAMBORANHA et al., 2013):

$$r = \frac{\sum (o_i - \bar{o})(s_i - \bar{s})}{\{[\sum (o_i - \bar{o})^2][\sum (s_i - \bar{s})^2]\}^{0,5}} \quad (22)$$

em que S_i são os valores simulados, \bar{S} é a média dos valores simulados, O_i são os valores observados e \bar{O} é a média dos valores observados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CALIBRAÇÃO DO MODELO

Os parâmetros dos sub-modelos de emissão de folhas e fenologia calibrados para os três híbridos de arroz estão na Tabela 4 e Figura 3. O $LAR_{máx1,2}$ é maior no QM 1010 CL e menor no PRIME CL, indicando velocidade menor de emissão de folhas no PRIME CL do que nos outros dois híbridos (Figura 3). A soma térmica da fase Semeadura – Emergência

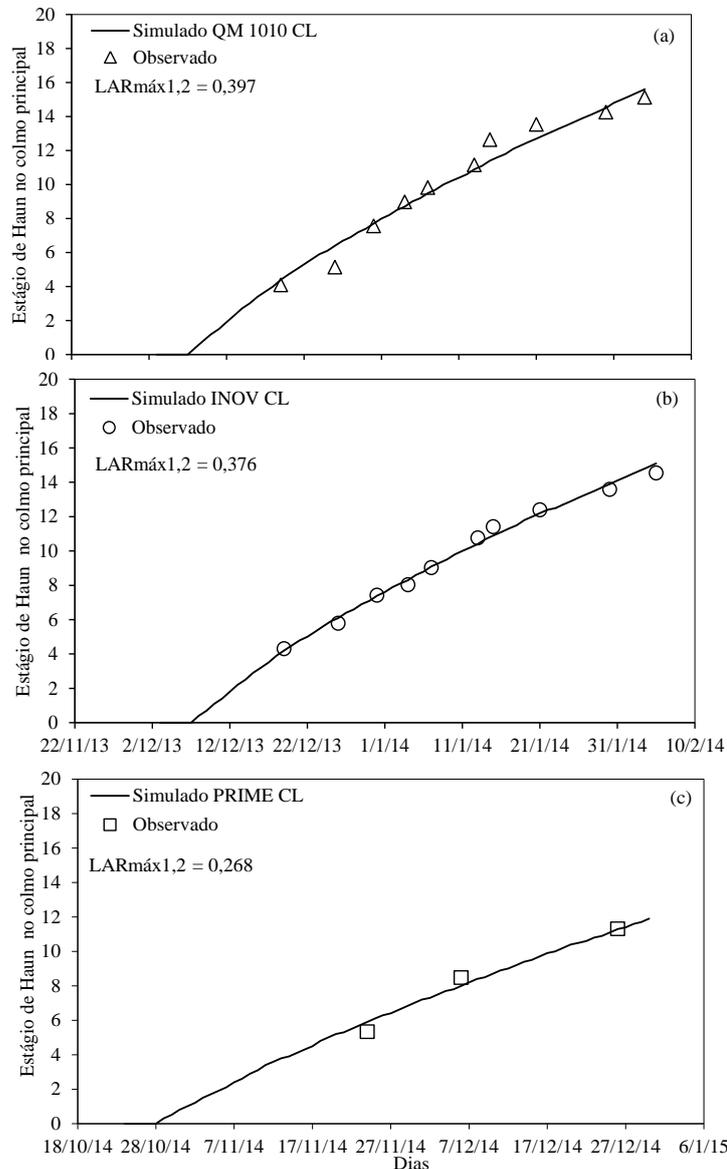
(TTTEM) é similar entre os três híbridos. A duração da fase Emergência – Diferenciação da Panícula (TTTVG) é menor nos dois híbridos precoces, principalmente no PRIME CL, comparado ao de ciclo médio (QM 1010 CL), indicando forte influência da duração desta fase no ciclo total, pois as outras fases (TTTRP e TTTEG) tem menos variação de duração entre os três híbridos. A soma térmica do ciclo total (TTTEM + TTTVG + TTTRP + TTTEG) é de 748,7, 871,7 e 953,8 °C dia para o ‘PRIME CL’, ‘INOV CL’ e ‘QM 1010 CL’ respectivamente.

Tabela 4 — Parâmetros dos sub-modelos de emissão de folhas e da fenologia no modelo SimulArroz calibrados para três híbridos de arroz. $LAR_{máx1,2}$ = a taxa máxima de aparecimento da primeira e segunda folhas (folhas dia⁻¹), TTTEM= soma térmica total necessária para completar a fase: Emergência - Diferenciação da panícula, TTTRP= soma térmica total necessária para completar a fase: Diferenciação da panícula – Antese, TTTEG= soma térmica total necessária para completar a fase: Antese - Maturação Fisiológica.

Parâmetro	Unidade	Híbridos		
		PRIME CL	INOV CL	QM 1010 CL
$LAR_{máx 1,2}$	folhas/dia	0,268	0,376	0,397
TTTEM	°C dia	50,0	51,4	51,4
TTTVG	°C dia	394,8	557,6	643
TTTRP	°C dia	175,3	145,9	142,2
TTTEG	°C dia	128,6	116,8	117,2

Fonte: A autora.

Figura 3 — Calibração do sub-modelo de emissão de folhas (Estádio de Haun) no colmo principal no modelo SimulArroz para três híbridos de arroz, em Santa Maria no ano agrícola 2013/2014 para as cultivares híbridas QM 1010 CL (a) e INOV CL (b) e em Uruguaiana no ano agrícola 2014/2015 para a cultivar híbrida PRIME CL (c). $LAR_{máx1,2}$ = taxa máxima de aparecimento da primeira e segunda folhas (folhas dia⁻¹).



Fonte: A autora.

Nas Tabelas 5 e 6 estão os parâmetros calibrados nos sub-modelos de crescimento e produtividade do modelo SimulArroz para três híbridos de arroz. A RUE é maior no QM 1010 CL e menor no PRIME CL, indicando menor quantidade de matéria seca produzida por

unidade de área de radiação interceptada pelo dossel no PRIME CL do que nos outros híbridos (Tabela 5).

Tabela 5 — Parâmetros dos sub-modelos de matéria seca e produtividade no modelo SimulArroz para três cultivares híbridas de arroz. RUE é a eficiência do uso da radiação (g MJ^{-1}), SOCF é fator de formação das espiguetas (espiguetas/gMS), Pmáx é o peso máximo de um grão (g).

Parâmetros	QM 1010 CL	INOV CL	PRIME CL
RUE	2,93	2,75	2,65
SOCF	49	50	39
Pmáx	0,031	0,031	0,030

Fonte: A autora.

Tabela 6 — Parâmetros do sub-modelo de partição de matéria seca do modelo SimulArroz calibrados para três híbridos e uma cultivar convencional de arroz. DVS= estágio de desenvolvimento da cultura do arroz irrigado, F.= Folhas, C.= Colmos, G.= Grãos.

DVS	Parte aérea	Híbridos									Convencional					
		QM 1010 CL			INOV CL			PRIME CL			Média			IRGA 424		
		F.	C.	G.	F.	C.	G.	F.	C.	G.	F.	C.	G.	F.	C.	G.
0	0,5	0,5	0,6	0,0	0,5	0,5	0,0	0,3	0,7	0,0	0,4	0,6	0,0	0,6	0,4	0,0
0,43	0,75	0,5	0,5	0,0	0,5	0,5	0,0	0,3	0,7	0,0	0,4	0,6	0,0	0,6	0,4	0,0
0,5	0,75	0,2	0,8	0,0	0,2	0,8	0,0	0,6	0,4	0,0	0,3	0,7	0,0	0,3	0,7	0,0
0,75	0,75	0,0	0,3	0,7	0,3	0,7	0,0	0,0	0,0	1,0	0,1	0,3	0,6	0,4	0,6	0,0
1,0	1,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	1,0
1,2	1,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	1,0
1,6	1,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	1,0
2,0	1,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	1,0

Fonte: A autora.

O Particionamento dos fotoassimilados dos híbridos de arroz irrigado é diferente da cultivar convencional IRGA 424. Na Tabela 6 é observado que a planta de arroz híbrido envia mais fotoassimilados da parte aérea para os colmos o que faz aumentar consideravelmente a matéria seca de colmo, ou seja, os colmos são os maiores drenos de fotoassimilados para os grãos (translocação de 60%, na média, até o DVS 0,43), o que é importante para a sustentar a maior panícula.

4.2 AVALIAÇÃO DO MODELO

A simulação do HS dos híbridos nos diferentes locais teve um RQME que variou de 0,5 a 1,9 folhas no colmo principal, enquanto que o RQME para a cultivar IRGA 424 variou de 0,3 a 1,5 folhas no colmo principal (Tabela 7). O índice BIAS variou de -0,03 a 0,45, indicando pequena subestimativa do modelo. O índice dw e o coeficiente de correlação, foram elevados para todos os híbridos (acima de 0,89). Considerando todos os locais, o RQME dos híbridos variou de 0,6 a 1,41 folhas (Figura 4a). Em Santa Maria, STRECK et al. (2008) reportaram RQME entre 0,6 a 0,9 folhas no colmo principal para a cultura do arroz irrigado utilizando o modelo Wang Engel. Estes resultados são similares aos reportado por STRECK et al. (2007) na cultura do trigo utilizando o mesmo modelo. Comparando as estatísticas dos híbridos com as estatísticas do IRGA 424 (Tabela 7 e Figura 4a), conclui-se que o SimulArroz simula bem o número de folhas, representado pelo HS, nos três híbridos.

Tabela 7 — Estatísticas do desempenho do modelo SimulArroz em simular o Estádio de Haun de três híbridos e uma cultivar convencional (IRGA 424) de arroz irrigado em quatro locais do Rio Grande do Sul durante o ano agrícola 2014/2015.

Local	Estatística	Híbridos			IRGA 424
		PRIME CL	INOV CL	QM1010 CL	
Santa Maria	RQME*	-	1,1	1,3	1,5
	BIAS	-	-0,03	0,01	-0,12
	dw	-	0,98	0,98	0,97
	r	-	0,99	0,98	0,99
Cachoeirinha	RQME	0,7	0,7	1,0	1,2
	BIAS	-0,18	0,07	0,19	0,15
	dw	0,93	0,95	0,89	0,97
	r	1,00	1,00	1,00	1,00
Uruguaiana	RQME	-	-	1,9	0,8
	BIAS	-	-	0,20	-0,05
	dw	-	-	0,90	0,98
	r	-	-	0,99	0,98
Santa Vitória do Palmar	RQME	0,5	-	1,4	0,3
	BIAS	-0,13	-	0,45	0,07
	dw	-.**	-	-.**	-.**
	r	-.**	-	-.**	-.**

*RQME = Raiz do quadrado médio do erro (folhas no colmo principal), BIAS = Índice Bias, dw = Índice de concordância, r = Coeficiente de correlação de Pearson. ** = Não foi possível calcular as estatísticas, pois só há dois pares de dados (observado, simulado).

Fonte: A autora.

O número final de folhas (NFF) no colmo principal é resolvido intrinsecamente no modelo SimulArroz (STRECK et al., 2013), ou seja, não há um sub-modelo para esta variável de desenvolvimento. A simulação do NFF para o conjunto de dados independentes teve um RQME de 1,1 folhas (Tabela 7) e as demais estatísticas (Figura 4b) indicam desempenho muito bom no modelo.

As estatísticas do desempenho do modelo SimulArroz em simular os estádios de desenvolvimento (EM, R1, R4 e R9), nos três híbridos, nos vários locais do RS estão na Tabela 8 e na Figura 4c. Entre os locais (Santa Maria, Cachoeirinha, Uruguaiana e Santa Vitória do Palmar), o RQME variou de 3,6 a 8,1 dias (Tabela 8) e considerando todos os locais juntos, o RQME foi de 4,2, 4,7 e 5,9 dias. Estes valores de RQME são próximos da variação de RQME da cultivar convencional IRGA 424.

Tabela 8 — Estatísticas do desempenho do modelo SimulArroz em simular a data de emergência (EM), diferenciação da panícula (R1), antese (R4), e maturação fisiológica (R9) de três híbridos e uma cultivar convencional (IRGA 424) de arroz irrigado em quatro locais do Rio Grande do Sul durante o ano agrícola 2014/2015.

Local	Estatística	Híbridos			IRGA 424
		PRIME CL	INOV CL	QM1010 CL	
Santa Maria	RQME*	-	5,0	8,1	4,1
	BIAS	-	0,02	0,08	0,03
	dw	-	1,00	0,97	0,99
	r	-	1,00	1,00	1,00
Cachoeirinha	RQME	3,6	3,6	4,9	4,1
	BIAS	-0,05	-0,05	-0,04	-0,05
	dw	1,00	1,00	1,00	1,00
	r	1,00	1,00	1,00	1,00
Uruguaiana	RQME	-	-	5,8	6,1
	BIAS	-	-	-0,04	0,01
	dw	-	-	1,00	0,99
	r	-	-	0,99	0,99
Santa Vitória do Palmar	RQME	5,6	-	4,7	5,4
	BIAS	-0,08	-	-0,06	-0,06
	dw	0,99	-	1,00	1,00
	r	1,00	-	1,00	1,00
Todos os locais	RQME	4,7	4,2	5,9	4,9
	BIAS	-0,07	0,01	-0,02	-0,02
	dw	1,00	1,00	0,99	1,00
	r	1,00	0,99	0,99	0,99

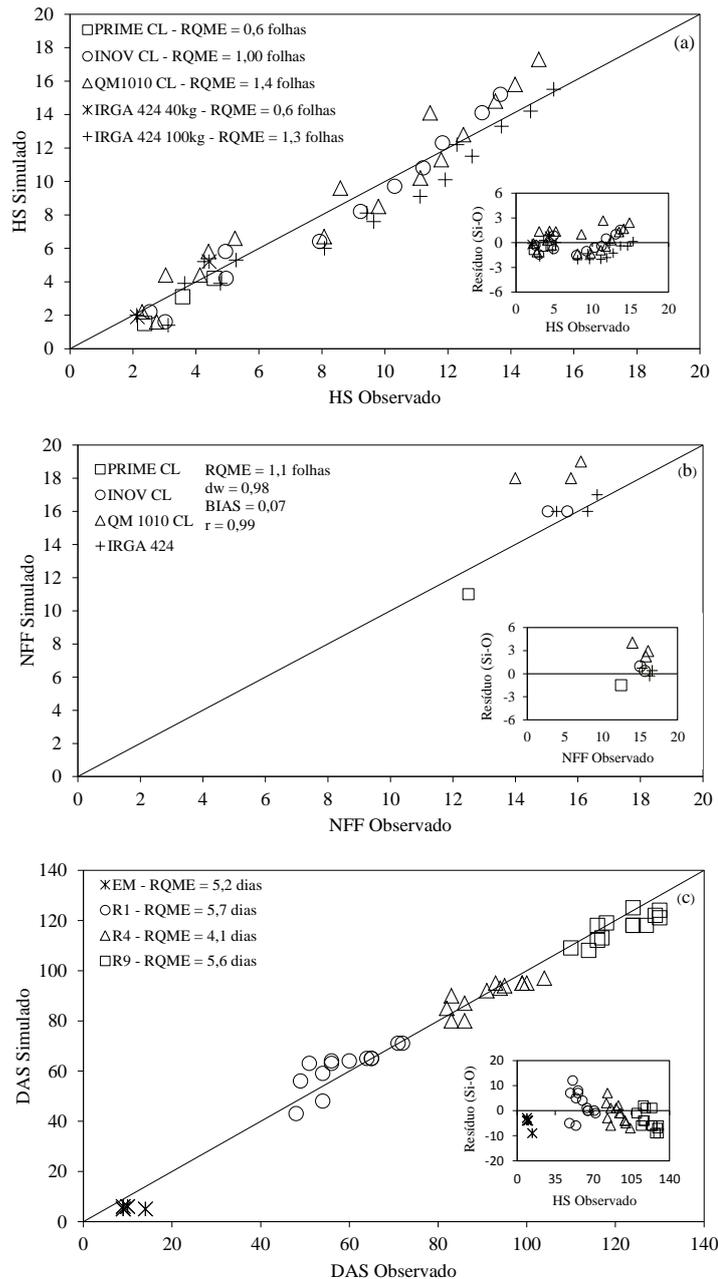
*RQME = Raiz do quadrado médio do erro (folhas no colmo principal), BIAS = Índice Bias, dw = Índice de concordância, r = Coeficiente de correlação de Pearson.

Fonte: A autora.

Entre os estádios de desenvolvimento, o erro para os estádios EM, R1, R4 e R9 variou de 4 a 5 dias (Figura 4c). Em Domanínek, Republica Tcheca, POHANKOVÁ et al. (2013) reportaram um RQME de 5,0 e 4,3 dias para os estádios florescimento e maturidade na cultura do trigo usando o modelo HERMES. Assim, conclui-se que o modelo simulou bem para a fenologia, mas subestima a data de emergência em todos os locais (Figura 4c), ou seja, a data de emergência foi mais rápida pelo modelo do que a observada em campo. Esta rápida emergência pelo modelo pode estar relacionado a três fatores que podem afetar a velocidade de emergência em campo e que o modelo não considera: (i) profundidade de semeadura, (ii)

temperatura do solo (o modelo usa temperatura do ar para estimar a velocidade de emergência) e (iii) precipitação entre a semeadura e a emergência, que pode alterar a temperatura do solo bem como criar um ambiente de anoxia (falta de oxigênio) no solo, o que retarda a velocidade de germinação da semente. Rodando-se o modelo a partir da data de emergência observada, o RQME foi de 7,2 dias, 4,8 dias e 4,5 dias para R1, R4 e R9, respectivamente.

Figura 4 — (a) Número de folhas no colmo principal (HS), (b) número final de folhas no colmo principal (NFF) e (c) dias após a semeadura (DAS) dos estádios emergência (EM), diferenciação da panícula (R1), antese (R4) e maturidade fisiológica (R9) observado e simulado com o modelo SimulArroz para três híbridos (PRIME CL, INOV CL e QM 1010 CL) e uma cultivar convencional (IRGA 424) de arroz irrigado no Rio Grande do Sul no ano agrícola 2014/2015. Os dados dos quatro locais (Santa Maria, Cachoeirinha, Uruguaiana e Santa Vitoria do Palmar) estão juntos. Os gráficos inseridos em cada painel são os resíduos (simulado-observado) versus os valores observados.

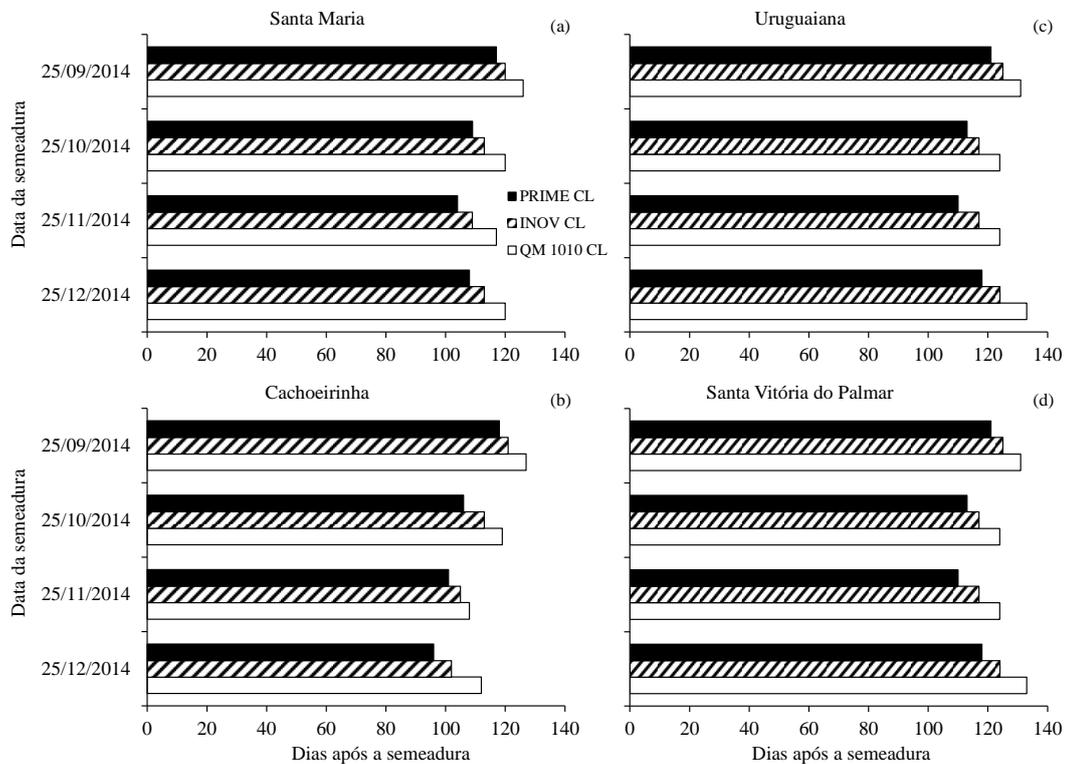


Fonte: A autora.

O modelo SimulArroz foi usado como modelo de arroz para testar uma metodologia de precisão numérica de safra para o RS e para estudos do impacto das mudanças climáticas projetadas para este século sobre a cultura do arroz neste Estado (WALTER et al., 2014). Estes estudos foram realizados com a versão 1.0 do modelo. O presente trabalho tem o objetivo de incorporar a genética híbrida no SimulArroz, pois trata da calibração do “relógio” da planta de arroz (número de folhas e fenologia), a matéria seca e a produtividade. O conjunto de dados independentes para emissão de folhas e fenologia, matéria seca e produtividade é proveniente de quatro, dois e seis locais, respectivamente, distribuídos na região orizícola do RS, e por tanto representa as diferentes condições de cultivo de arroz no Estado, o que aumenta a garantia de que o modelo tem aplicação em toda a área orizícola do RS (Figura 1).

Na Figura 5, está apresentado uma aplicação do SimulArroz em descrever a interação genótipo x ambiente sobre a duração do ciclo de desenvolvimento (Semeadura até R9) das três cultivares de arroz híbrido em quatro datas de semeadura (25/09, 25/10, 25/11 e 25/12) nos quatro locais do RS representados na Figura 1 (Santa Maria, Cachoeirinha, Uruguaiana e Santa Vitória do Palmar) durante o ano agrícola 2014/2015.

Figura 5 — Duração do ciclo de desenvolvimento (Semeadura até R9) em três cultivares híbridas de arroz irrigado (INOV CL, PRIME CL e QM 1010 CL) em quatro datas de semeadura (25/09/2014, 25/10/2014, 25/11/2014 e 25/12/2014) em Santa Maria (a), Cachoeirinha (b), Uruguaiiana (c) e Santa Vitória do Palmar (d), RS, simuladas com o modelo SimulArroz.



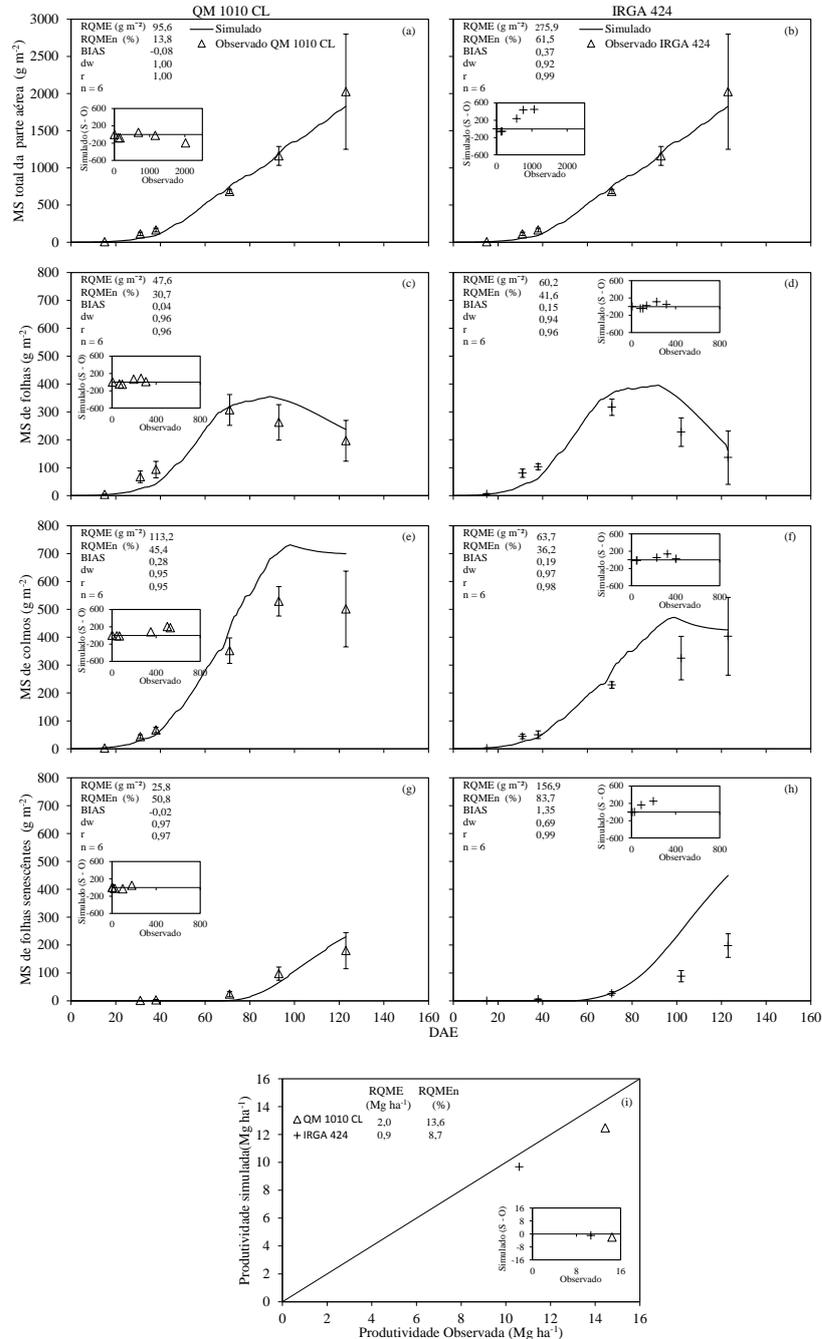
Fonte: A autora.

A sequência de duração do ciclo em todas as datas de semeadura e locais, foi ‘QM 1010 CL’ > ‘INOV CL’ > ‘PRIME CL’, consistente com o grupo de maturação do ‘QM 1010 CL’ (ciclo médio) e do ‘INOV CL’ e ‘PRIME CL’ (ambos os ciclo precoce) (SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO, 2014). Em relação à data de semeadura, o ciclo diminuiu com o atraso na semeadura, exceto em Uruguaiiana onde o ‘QM 1010 CL’ teve a maior duração do ciclo na semeadura de 25/12, em função das baixas temperaturas neste local. Entre os locais, a duração do ciclo foi maior em Santa Vitória do Palmar (semeadura em 25/09) e em Uruguaiiana (semeadura 25/12). Nestes dois locais, pela localização geográfica (Fronteira Oeste e Extremo Sul, respectivamente, Figura 1), a temperatura mais baixa na primavera (Santa Vitória do Palmar) e no outono (Uruguaiiana) determinou a menor taxa diária de desenvolvimento e consequente alongamento do ciclo. Nos outros dois locais (Santa Maria e Cachoeirinha), localizados na região fisiográfica da Depressão Central Planície

Costeira Interna (Figura 1) respectivamente, a temperatura foi maior durante toda a estação de crescimento, e por isso o modelo simulou a menor duração do ciclo de desenvolvimento nestes locais. Considerando todos os locais e datas de semeadura, o ciclo total variou de 121 a 96 dias no 'PRIME CL', de 127 a 102 dias no 'INOV CL' e de 134 a 108 dias no 'QM 1010 CL'. Estas faixas de variação de ciclo entre locais e datas de semeadura estão coerentes com a duração do ciclo destes três híbridos no documento das indicações técnicas para a cultura do arroz no RS, que é de 110 dias, 120 dias e 135 dias, respectivamente (SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO, 2014).

Na Figura 6 estão os painéis com a validação a MS total da parte aérea, de folhas (g m^{-2}), colmos (g m^{-2}), de folhas senescidas (g m^{-2}) e produtividade, que foi realizada somente para a cultivar híbrida QM 1010 CL e para uma cultivar convencional (IRGA 424). A cultivar QM 1010 CL difere da cultivar IRGA 424 na partição de assimilados de MS total da parte aérea, de folhas, de colmos, de folhas senescentes e grãos (Figura 6 e Tabela 6). O híbrido QM 1010 CL apresentou maior produção de assimilados para MS total da parte aérea, para colmos e menor produção para MS de folhas e de folhas senescentes quando comparado com a cultivar convencional IRGA 424 (Figura 6 e Tabela 6).

Figura 6 — (a) e (e) Matéria seca total da parte aérea, (b) e (f) matéria seca de folhas, (c) e (g) matéria seca de colmos, (d) e (h) matéria seca de folhas senescentes, (i) Produtividade observado e simulado com o modelo SimulArroz para a cultivar híbrida QM 1010 CL (a, b, c, d, i) e para a cultivar convencional IRGA 424 (e, f, g, h, i) de arroz irrigado no Rio Grande do Sul no ano agrícola 2013/2014 em Santa Maria. Os gráficos inseridos em cada painel são os resíduos (simulado-observado) versus os valores observados.

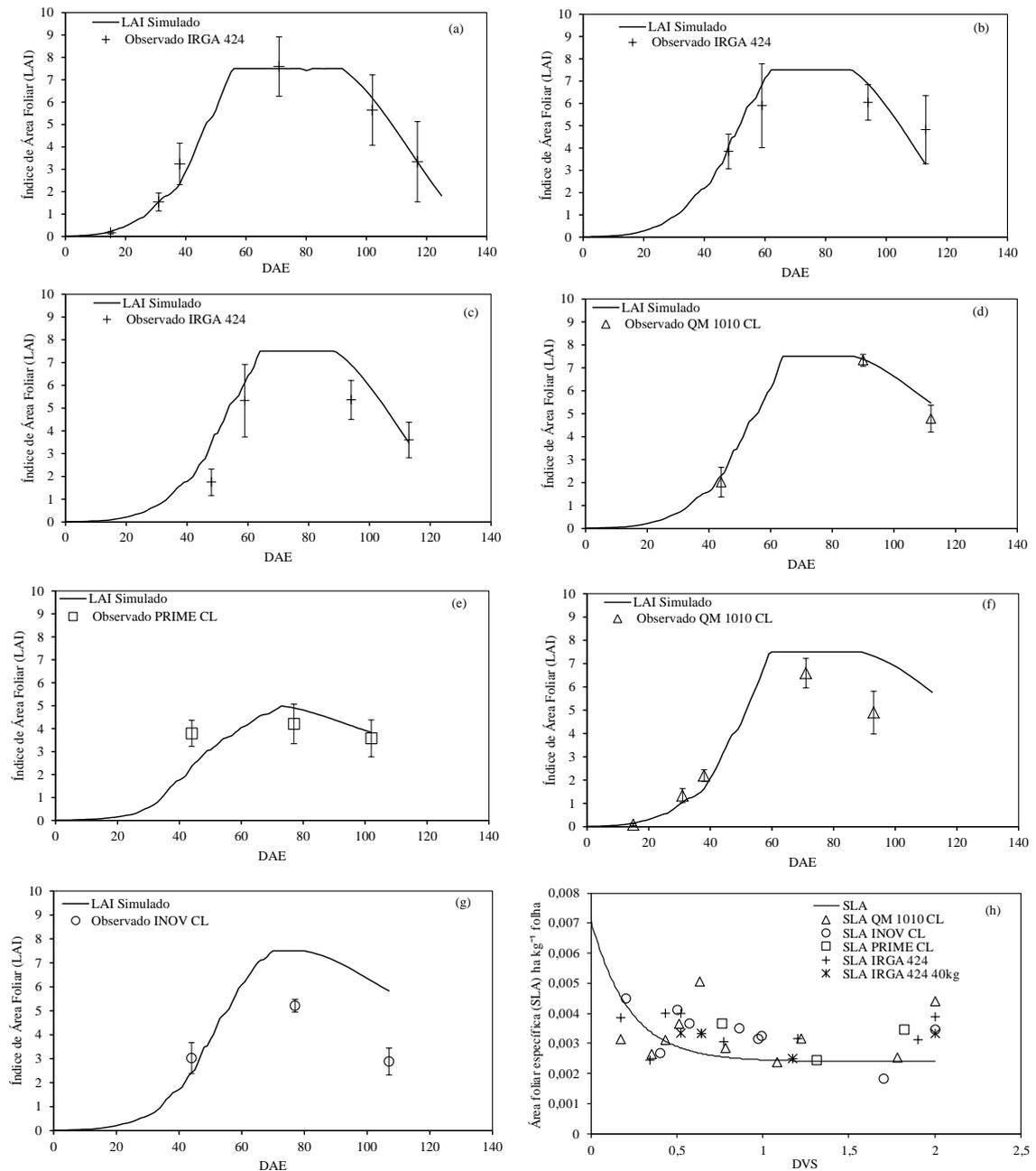


Fonte: A autora.

A simulação do híbrido QM 1010 CL na MS total da parte aérea, MS de folhas, MS de colmos e MS de folhas senescentes teve um RQME que variou de 25,8 a 113,2 g m⁻² e RQMEn que variou de 13,8% a 50,8%, enquanto que o RQME para a cultivar IRGA 424 variou de 60,2 a 275,9 g m⁻² (Figura 6). O índice BIAS variou de -0,08 a 0,28, indicando pequena subestimativa do modelo. O índice dw e o coeficiente de correlação, foram elevados para o híbrido (acima de 0,95). Comparando as estatísticas do híbrido com as estatísticas do IRGA 424 (Figura 6), conclui-se que o SimulArroz simula de maneira satisfatória o acúmulo de MS de folhas, MS de colmos, MS de folhas senescentes e produtividade. Nas Filipinas, BOLING et al. (2011) reportaram um RQME de 57 g m⁻² e RQMEn de 20% para a MS total da parte aérea usando o modelo ORYZA2000. Este resultado também é similar ao reportado por TANG et al. (2009) onde o RQME variou de 81 a 139 g m⁻² para a parte aérea, 27,8 g m⁻² e 83,2 g m⁻² em Kyoto, e 46,7 g m⁻², e 85,6 g m⁻² em Nanjing, para as folhas e a produtividade usando os modelos RiceCrop e ORYZA2000. Dessa forma, conclui-se que o modelo SimulArroz simulou bem a MS total da parte aérea, folhas e produtividade.

O LAI variou com o desenvolvimento da cultura sendo máximo aos 73 (LAI máximo foi 4,9), 80 (LAI máximo foi 7,5) e 88 (LAI máximo foi 7,5) dias após a emergência (DAE) para as cultivares híbridas PRIME CL, INOV CL e QM 1010 CL, e aos 90 DAE para a cultivar convencional IRGA 424 (Figura 7). Após, houve decréscimo do LAI, o que era esperado, pois a área foliar verde vai reduzindo, em virtude da remobilização dos nutrientes das folhas velhas para o enchimento dos grãos. As plantas de arroz apresentaram três fases de crescimento: da emergência até um crescimento inicial lento, uma fase exponencial de crescimento até o LAI máximo e por volta dos estádio um declínio do LAI, em decorrência da senescência. Os híbridos INOV CL (Figura 7d) e PRIME CL (Figura 7e) apresentaram menor tamanho de folha na maioria dos estádios de desenvolvimento, menor área foliar por planta e menor LAI quando comparado ao híbrido QM 1010 CL (Figuras 7b e 7c) e a cultivar convencional IRGA 424 (Figuras 7a, 7f e 7g). O LAI não foi calibrado para as cultivares híbridas, pois a SLA (Figura 7h) teve uma pequena variação e não diferiu da cultivar convencional.

Figura 7 — Valores observados e simulados pelo modelo SimulArroz do índice de área foliar (IAF) para híbrido QM 1010 CL (d) e para a cultivar convencional IRGA 424 (a) no ano agrícola 2013/2014 em Santa Maria e para os três híbridos de arroz QM 1010 CL (f), INOV CL (g), PRIME CL (e) e para a cultivar convencional IRGA 424 (b) e (c) no ano agrícola 2014/2015 em Cachoeirinha, Rio Grande do Sul. A área foliar específica (ha kg⁻¹ folha) (h) para os três híbridos e para uma cultivar convencional (IRGA 424) no Rio Grande do Sul, nos anos agrícolas 2013/14 em Santa Maria e 2014/15 em Cachoeirinha estão juntas no mesmo painel.



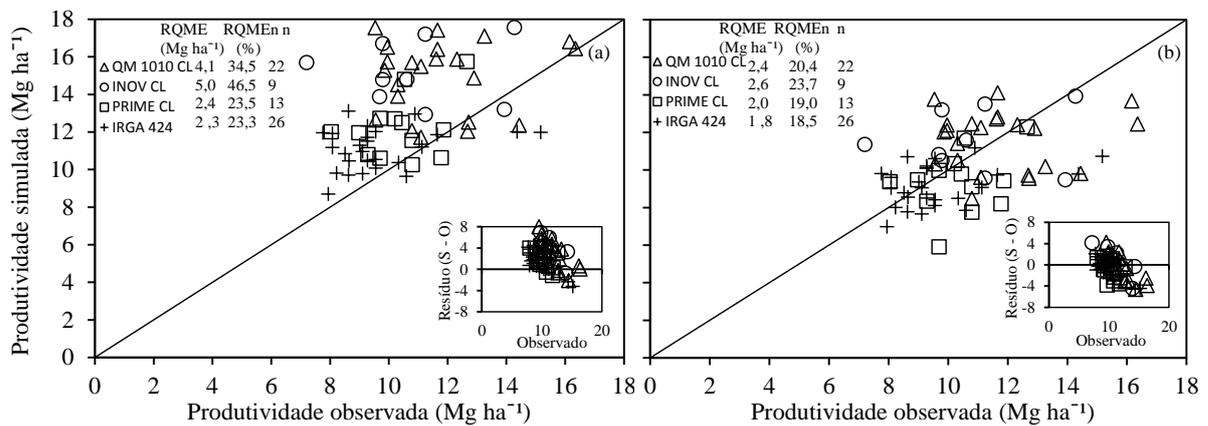
Fonte: A autora.

Para avaliar o desempenho do modelo SimulArroz em simular a produtividade de grãos de arroz observada nos diferentes locais e datas de semeadura (Tabela 3) rodou-se o modelo para os 7 locais em nível tecnológico potencial e alto, para os três híbridos e uma cultivar convencional (Figura 8). O nível tecnológico potencial representa áreas experimentais sem estresse biótico e abiótico, enquanto que o nível tecnológico alto representa as lavouras bem manejadas que se enquadram no projeto 10 do IRGA. O Projeto 10 preconizou o manejo integrado de plantas daninhas, insetos e doenças, aumento dos níveis de adubação e antecipação da época de semeadura o que resultou no aumento da produtividade média de 5 ton ha⁻¹ para 7,5 ton ha⁻¹ (MENEZES et al., 2013).

Rodando o modelo para as três cultivares híbridas utilizando o nível tecnológico potencial o RQME variou de 2,4 a 5,0 Mg ha⁻¹ e o RQMEn variou de 23,5 a 46,5 (Figura 8a), valores próximos aos obtidos para a cultivar convencional IRGA 424. Rodando o modelo para o nível tecnológico alto o RQME variou de 2,1 a 2,4 Mg ha⁻¹ e o RQMEn variou de 19,2 a 23,9 e a variação de RQME e RQMEn da cultivar convencional IRGA 424 também são próximos (Figura 8b). Na China, TANG et al. (2009) reportaram um erro entre as produtividades que variou de 0,6 a 9,6 Mg ha⁻¹ e 5,7 a 10,9 Mg ha⁻¹ usando os modelos RiceGrow e ORYZA2000, e estes resultados também são similares aos reportado por BOLING et al. (2011) onde o RQME foi de 0,06 a 10,58 Mg ha⁻¹ e o RQMEn foi de 20,0%. Dessa forma, conclui-se que o modelo SimulArroz simulou de maneira satisfatória, para o produtividade de grãos. Com erros na maior parte das vezes menores que os reportados na literatura.

O vigor híbrido expresso nas cultivares híbridas, encontrado a partir das rodadas de produtividades, foi de 28% na condição potencial e 18% na condição nível tecnológico alto. Estes valores estão de acordo com os encontrados na literatura, em que as cultivares híbridas podem alcançar produtividades 20 a 30% maiores do que as cultivares convencionais (COIMBRA et al., 2006). Já o vigor híbrido alcançado nos VCUs do IRGA foi de 13% o que indica que a condução dos experimentos nos VCUs se enquadram melhor no nível tecnológico alto (Figura 8b). Isso acontece em virtude da dificuldade de conduzir experimentos de campo na condição potencial, pois o potencial produtivo é estimado por modelos que assumem o perfeito manejo e ausência de estresse biótico o que em experimentos de campo é muito difícil de ser alcançado (LOBELL et al., 2009). Assim, conclui-se que o modelo simulou bem para a produtividade nos dois níveis tecnológicos, mas foi melhor para as rodadas feitas no nível tecnológico alto, pois a variação da RQME e RQMEn foi menor (Figura 8b).

Figura 8 — Produtividade simulada de três híbridos (QM 1010 CL, INOV CL e PRIME CL) e uma cultivar convencional (IRGA 424), observado e simulado pelo modelo SimulArroz e observada em Santa Vitória do Palmar, Uruguaiiana, Cachoeirinha, Cachoeira do Sul, Camaquã, Bagé e Santa Maria. Os dados observados foram de experimentos e VCUs, em cinco anos agrícolas (2010/2011, 2011/2012, 2012/2013, 2013/2014 e 2014/2015). Os dados simulados são no nível potencial (a) e alto (b) do SimulArroz.

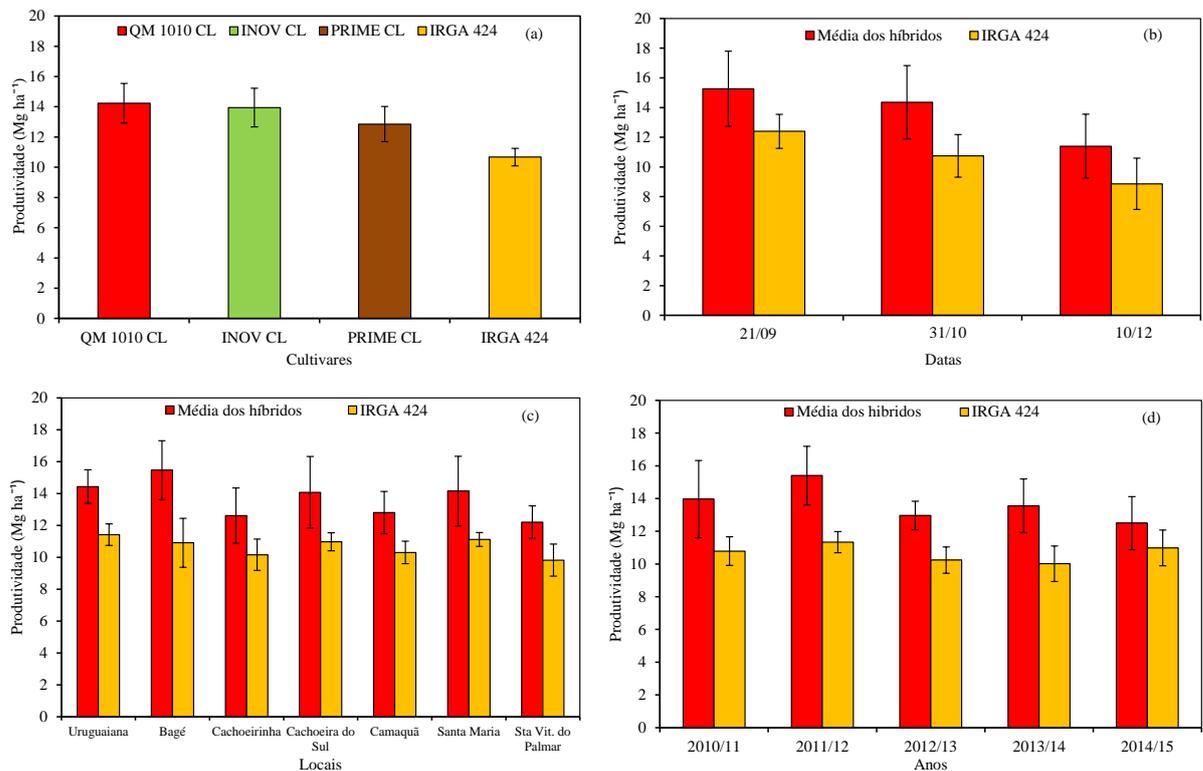


Fonte: A autora.

O modelo SimulArroz foi usado para testar uma metodologia de previsão numérica de safra e para estudos do impacto da mudança climática projetada para este século sobre a cultura do arroz no RS (WALTER et al., 2014). Estes estudos foram realizados com a versão 1.0 do modelo. O presente trabalho é o segundo passo (o primeiro é a calibração da fenologia) para a incorporação da genética híbrida no SimulArroz, pois trata da calibração do crescimento da planta de arroz (MS total da parte aérea, de folhas, de colmos, de folhas senescentes e produtividade). O conjunto de dados independentes é proveniente de sete locais distribuídos na região orizícola do RS, e portanto, representa as diferentes condições de cultivo de arroz no Estado, o que aumenta a garantia de que o modelo tem aplicação em toda a área orizícola do RS (Figura 1b).

Na Figura 9, é apresentada uma aplicação do SimulArroz em descrever o potencial produtivo para o nível tecnológico potencial das três cultivares de arroz híbrido e uma cultivar convencional em três datas de semeadura (21/09, 31/10, 10/12) nos sete locais do RS representados na Figura 1b (Santa Vitória do Palmar, Uruguaiiana, Cachoeirinha, Cachoeira do Sul, Camaquã, Bagé e Santa Maria) durante os cinco anos agrícolas (2010/2011, 2011/2012, 2012/2013, 2013/2014 e 2014/2015).

Figura 9 — Efeito de cultivar (a), de datas de semeadura (b), de local (c) e de ano (d) sobre a produtividade de grãos a 13% de umidade simulado pelo modelo SimulArroz utilizando três cultivares híbridas (QM 1010 CL, INOV CL e PRIME CL), a média delas e uma cultivar convencional (IRGA 424) em sete locais (Santa Vitória do Palmar, Uruguaiiana, Cachoeirinha, Cachoeira do Sul, Camaquã, Bagé e Santa Maria), para as datas de semeadura de 21/09, 31/10 e 10/12 em 5 anos agrícolas (2010/2011, 2011/2012, 2012/2013, 2013/2014 e 2014/2015).



Fonte: A autora.

A sequência da produtividade em todas as datas de semeadura e locais, foi ‘QM 1010 CL’ > ‘INOV CL’ > ‘PRIME CL’ > ‘IRGA 424’ (Figura 9a), sendo consistente com a produtividade esperada para o grupo de maturação do ‘QM 1010 CL’ (ciclo médio), do ‘INOV CL’ e do ‘PRIME CL’ (ambos ciclo precoce) e com o vigor híbrido expresso pelos híbridos (28%) comparado com a cultivar convencional ‘IRGA 424’ (ciclo médio). A variação de produtividade de grãos entre datas de semeadura (Figura 9b) também foi verificada por ROSA et al. (2015), uma vez que o potencial de produtividade diminuiu com o atraso da data de semeadura. Entre os locais (Figura 9c) os maiores potenciais de produtividade nas regiões da Fronteira Oeste e Campanha (representadas pelos municípios de Uruguaiiana e Bagé, respectivamente) é explicado pela maior disponibilidade de radiação solar nestas regiões do RS (STEINMETZ et al., 2013).

A produtividade de arroz no Rio Grande do Sul também pode variar entre anos. Na Figura 9d, o destaque é o ano agrícola 2011/12 com a maior produtividade simulada pelo modelo. Este ano foi um ano de La Niña, com precipitação e umidade relativa do ar abaixo da normal climatológica e radiação solar maior, o que resultou em maior crescimento e produtividade.

A partir de dezembro de 2016 será lançada uma nova versão do SimulArroz (versão 1.1) que contempla a opção de três cultivares híbridas de arroz irrigado e iniciarão os trabalhos para a introdução de mais cultivares no modelo SimulArroz.

5 CONCLUSÃO

O modelo SimulArroz está calibrado e avaliado para simular o número de folhas no colmo principal, representado pelo Estádio de Haun, a fenologia, a matéria seca total da parte aérea, de folhas, de colmos, de folhas senescentes e a produtividade de grãos a 13% de umidade de três híbridos de arroz irrigado no Rio Grande do Sul.

6 REFERÊNCIAS

- AGGARWAL, P. K.; KROPFF, M. J.; TUONG T. P.; WOPEREIS, M. C. S.; TEN BERGE, H. F. M.; VAN LAAR, H. H. InfoCrop: A dynamic simulation model for the assessment of crop yields, losses due to pests, and environmental impact of agro-ecosystems in tropical environments. I. Model description. **Agricultural Systems**, Netherlands, v. 89, p. 1-25, julho. 2006.
- BOLDRINI, I. I.; LONGHI-WAGNER, H. M.; BOECHAT, S. C. **Morfologia e taxonomia de gramíneas sul rio grandenses**. 2. Ed. Porto Alegre: UFRGS, 2005. 96 p.
- BOLING, A.A.; BOUMAN, B.A.M.; TUON, T.P.; KONBOON, Y.; HARNPICHITVITAYA, D. Yield gap analysis and the effect of nitrogen and water on photoperiod-sensitive Jasmine rice in north-east Thailand. **Elsevier**. v. 58, p. 11-19, 2011.
- BORGES, A. C.; MENDIONDO, E. M. Comparação entre equações empíricas para estimativa da evapotranspiração de referência na Bacia do Rio Jacupiranga. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, 11, p. 293–300, janeiro. 2007.
- BOUMAN, B. A. M.; KROPFF, M. J.; TUONG, T. P.; WOPEREIS, M. C. S.; TEN BERGE, H. F. M.; VAN LAAR, H. H. **ORYZA 2000**: modeling lowland rice. Version 2.12, november, 2004.
- CANTRELL, R. P. Foreword. In: VIRMANI, S. S.; MAO; C. X.; HARD, B. **Hybrid rice for food security poverty alleviation, and environmental protection**. Filipinas: IRRI - International Rice Research Institute, 2003, p. 4.
- CASTRO, P. R. C., FERREIRA, S. O.; YAMADA, T. **Ecofisiologia da produção agrícola. Piracicaba**: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. 1987. 247p.
- COIMBRA, J. L. M.; OLIVEIRA, A. C.; CARVALHO, F. I. F.; MAGALHÃES, A. M. J.; FAGUNDES, P. R. R.; KOPP, M. M. Heterose em arroz híbrido. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v. 12, n. 3, p. 257-264, jul-set, 2006.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos- safra 2015/16**. Brasília: CONAB. Acesso em 20 de janeiro de 2016. Disponível em: < <http://www.conab.gov.br>>
- COUNCE, P.; KEISLING, T. C.; MITCHELL, A. J. A uniform, objective, and adaptative system for expressing rice development. **Crop Science**, Madison, v.40, n.2, p.436-443, fev. 2000.
- ELLIS, R. H.; QI, A.; SUMMERFIELD R. J.; ROBERTS E. H. Rates of leaf appearance and panicle development in rice (*Oryza sativa* L.): A comparison at three temperatures. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 66, p. 129–138, 1993.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. International year of rice 2004 rice is life. 2004. Disponível em: < <http://www.fao.org/rice2004/en/f-sheet/factsheet6.pdf> > Acesso em 04 de dezembro de 2015. 2015.

- GABRIEL, L. F.; STRECK, N. A.; ROBERTI, D. R.; CHIELLE, Z. G.; UHLMANN, L. O.; SILVA, M. R. da.; SILVA, S. D. da. Simulating Cassava Growth and Yield under Potential. **Agronomy Journal**, v. 106, p. 1119-1137, junho. 2014.
- GAO, L.; JIN, Z.; HUANG, Y.; ZHANG, L. Rice clock model — A computer model to simulate rice development. **Agricultural and Forest Meteorology**, 60, p. 1–16, 1992.
- HAUN, J.R. Visual quantification of wheat development. **Agronomy Journal**, Madison, v.65, p.116-119, 1973.
- INFELD, J. A., SILVA, J. B.; ASSIS, F. N. Temperatura base e graus-dia durante o período vegetativo de três grupos de cultivares de arroz irrigado. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 6, p. 187-191, 1998.
- INSTITUTO RIO GRANDENSE DO ARROZ. **Levantamento da área semeada com arroz irrigado híbrido no Rio Grande do Sul, 2015**. Porto Alegre: IRGA. Acesso em 20 de setembro de 2015. Disponível em: <<http://www.irga.rs.gov.br>>
- INTERNATIONAL RICE RESEARCH INSTITUTE. Proceedings of the International Symposium on Hybrid Rice. In: ZHENDE, Y. **Agronomic management of rice hybrids compared with conventional varieties**. Phillipinas: IRRI, 1988. p. 215 – 217.
- JANSSEN, P. H. M., HEUBERGER, P. S. C. Calibration of process-oriented models. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 83, n. 1, p. 55-56, 1995.
- KINIRY, J. R. et al. Rice parameters describing crop performance of four U.S. cultivars. **Agronomy Journal**, v.93, p.1.354-1.361, 2001.
- KROPFF, M. J.; VAN LAAR, H. H.; MATTHEWS, R. B. ORYZA1: an ecophysiological model for irrigated rice production. In: **SARP Research Proceedings**. Los Banos, Philippines: International Rice Research Institute - IRRI, 1994. 110 p.
- LI, J.; YUAN, L. Hybrid rice: breeding, and seed production. **Plant Breeding Reviews**, 17, p. 15-158, 2000.
- LOBELL, D. B.; CASSMAN, K. G.; FIELD, C. B. Crop yield gaps: their importance, magnitudes, and causes. **Annual Review of Environment and Resources**, USA, v.34, p. 4.1-4.26, junho, 2009.
- MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Cultura do Arroz no Rio Grande do Sul, 2015. Disponível em: <[http:// Zoneamento-Agrícola-Arroz-irrigado-RS-Ano-safra-2013.14](http://Zoneamento-Agrícola-Arroz-irrigado-RS-Ano-safra-2013.14)> Acesso em 04 de dezembro de 2015. 2015.
- MENEZES, V. G.; ANGHINONI, I.; SILVA, P. R. F. da; MACEDO, V. R. M.; PETRY, C.; GROHS, D. S.; FREITAS, T. F. S. de; VALENTE, L. A. L. **Projeto 10 - Estratégias de manejo para aumento da produtividade e da sustentabilidade da lavoura de arroz irrigado do RS: avanços e novos desafios**. Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA), Cachoeirinha. 2013. 104p.

MERCANTE, E.; LAMPARELLI, R. A. C.; URIBE-OPAZO, M. A.; ROCHA, J. V. Modelos de regressão lineares para estimativa de produtividade da soja no oeste do Paraná, utilizando dados espectrais. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.30, n.3, p.504-517, 2010.

PESKE, S. T.; SCHUCH, L. O. B.; BARROS, A. C. S. A. **Produção de arroz irrigado**, Pelotas: Universidade Federal de Pelotas. 2004.

POHANKOVÁ, E.; TRNKA, M.; HLAVINKA, P.; TAKÁČ, J.; ŽALUD, Z. Calibration of the crop growth models for winter wheat. **MendelNet**. p. 130 – 135. 2013.

RANGEL, P. H.; GUIMARÃES, E. P.; NEVES, P. C. F. Bases genética das cultivares de arroz (*Oryza sativa* L.) irrigado do Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v. 31, n. 5, maio. 1996.

ROSA, H. T.; WALTER, L. C.; STRECK, N. A.; CARLI, C de.; RIBAS, G.G.; MARCHESAN, E. Simulação do crescimento e produtividade de arroz no Rio Grande do Sul pelo modelo SimulArroz. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. 19, p. 1159–1165, outubro. 2015.

SAMBORANHA, F. K.; STRECK, N. A.; UHLMANN, L. O.; GABRIEL, L. F. Modelagem matemática do desenvolvimento foliar em mandioca. **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, p. 815-824, 2004.

SENTELHAS, P. C.; BATTISTI, R. ; CÂMARA, G. M. S. ; FARIAS, J. R. B. ; HAMPF, A. C. ; NENDEL, C. The soybean yield gap in Brazil - magnitude, causes and possible solutions for sustainable production. **Journal of Agricultural Science**, v. 153, p. 1394-1411, 2015.

SHIN, D. W.; BAIGORRIA, G. A.; LIM, Y. K.; COCKE, S.; LAROW, T. E.; O'BRIEN, J. J.; JONES, J. W.. Assessing maize and peanut yield simulations with various seasonal climate data in the Southeastern United States. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 49, p. 592-603, 2010.

SHIN, D. W.; BELLOW, J. G.; LAROW, T. E.; COCKE, S.; O'BRIEN, J. J. The role of an advanced land model in seasonal dynamical downscaling for crop model application. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v.45, p.686-701, 2006.

SINGH, U.; RITCHIE, J. T.; GODWIN, D. C. **A Users Guide to CERES Rice v 2.10. :** simulation manual. Muscle Shoals, AL, USA: International Fertilizer Development Center, 1993. 131 p.

SOCIEDADE SUL BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO. **Arroz irrigado:** Recomendações técnicas da pesquisa para o sul do Brasil. Bento Gonçalves: 2014. 192 p.

SOLTANI, A.; ZEINALI, E.; GALESHI, S.; NIARI, N. Simulating GFDL predicted climate change impacts on rice cropping in Iran. **Journal of Agricultural Science and Technology**, Tehrân, v.3, p.81-90, 2001.

STEINMETZ, S.; CUADRA, S. V.; PEREIRA, C. B.; SANTOS, E. L. dos; ALMEIDA, I. R. de. GD Arroz: Programa baseado em guias-dia como suporte ao planejamento e à tomada de

decisão no manejo do arroz irrigado. **Circular Técnica 162**. EMBRAPA. Pelotas, p. 1-8, 2015.

STRECK, N. A.; ALBERTO, C. M. Estudo numérico do impacto da mudança climática sobre o rendimento de trigo, soja e milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.41, n.9, p.1351-1359, set. 2006.

STRECK, N. A.; WEISS, A.; BAENZIGER, P. S.; XUE, Q. Incorporating a chronology response function into the prediction of leaf appearance rate in winter wheat. **Annals of Botany**, 92, p. 181-190, outubro. 2003.

STRECK, N.A.; BOSCO, L.C.; LAGO, I. Simulating leaf appearance of some Brazilian wheat genotypes. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v.15, p.1-9, 2007.

STRECK, N. A.; BOSCO, L. C.; LUCAS, D. D. P.; LAGO, I. Modelagem da emissão de folhas em arroz cultivado e em arroz-vermelho. *Pesquisa agropecuária brasileira*. 2008, v.43, n.5, p.559-567, 2008.

STRECK, N. A.; CHARÃO, A. S.; WALTER, L. C.; ROSA, H. T.; BENEDETTI, R. P.; MARCHESAN, E.; SILVA, M. R. da. SimulArroz: um aplicativo para estimar a produtividade de arroz no Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 8., 2013, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria/RS: SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO, 2013. p.1618-1627.

TANG L.; ZHU Y.; HANNAWAY D.; MENG Y.; LIU L.; CHEN L.; CAO W. RiceGrow: A rice growth and productivity model. **Elsevier**, v.57, p.83-92, 2009.

VIRMANI, S. S. Advances in hybrid rice research and development in the tropics. In: VIRMANI, S. S.; MAO, C. X.; HARD, B. **Hybrid rice for food security poverty alleviation, and environmental protection**. IRRI: International Rice Research Institute. Manila, Filipinas, 2003. p. 5 -7.

WALTER, L. C.; ROSA, H. T.; STRECK, N. A.; FERRAZ, S. E. T. Adaptação e avaliação do modelo InfoCrop para simulação do rendimento de grãos da cultura do arroz irrigado. **Engenharia Agrícola**, 32, p. 510-521, maio-junho. 2012.

WALTER, L. C.; STRECK, N. A.; ROSA, H. T.; FERRAZ, S. E. T.; CERA, J. C. Mudanças climáticas e seus efeitos no rendimento de arroz irrigado no Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 49, p. 915-924, 2014.