

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

**SIMULAÇÃO DO RENDIMENTO DE GRÃOS DE
ARROZ IRRIGADO EM CENÁRIOS DE MUDANÇA
CLIMÁTICA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Lidiane Cristine Walter

Santa Maria, RS, Brasil

2010

SIMULAÇÃO DO RENDIMENTO DE GRÃOS DE ARROZ IRRIGADO EM CENÁRIOS DE MUDANÇA CLIMÁTICA

por

Lidiane Cristine Walter

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. Nereu Augusto Streck

Santa Maria, RS, Brasil

2010

W232s

Walter, Lidiane Cristine, 1985-

Simulação do rendimento de grãos de arroz irrigado em cenários de mudança climática / Lidiane Cristine Walter. - 2010.

67 f. ; il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, 2010.

“Orientador: Prof. Nereu Augusto Streck”

1. Engenharia agrícola 2. Modelagem 3. Aquecimento global 4. *Oryza sativa* 5. Segurança alimentar I. Streck, Nereu Augusto II. Título

CDU: 633.18

Ficha catalográfica elaborada por
Patrícia da Rosa Corrêa – CRB 10/1652
Biblioteca Setorial do Centro de Ciências Rurais/UFSM

© 2010

Todos os direitos autorais reservados a Lidiane Cristine Walter. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho poderá ser feita, desde que citada a fonte.

Fone: (55) 96216505. e-mail: lidianewalter@gmail.com

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola**

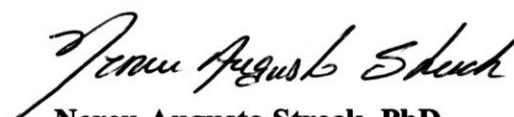
A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**SIMULAÇÃO DO RENDIMENTO DE GRÃOS DE ARROZ
IRRIGADO EM CENÁRIOS DE MUDANÇA CLIMÁTICA**

elaborada por
Lidiane Cristine Walter

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Agrícola

COMISSÃO EXAMINADORA:


Nereu Augusto Streck, PhD.
(Presidente/Orientador)


Evandro Zanini Righi, Dr. (UFSM)


Renata Pereira da Cruz, Dra. (IRGA)

Santa Maria, 18 de fevereiro de 2010.

Dedico com muito carinho aqueles que me deram a vida e me ensinaram a amar e lutar sempre, meus pais Roque Aloysio Walter e Sandra Walter. E ao meu noivo, Hamilton Telles Rosa pelo apoio e amor incondicional.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Roque e Sandra, que foram sempre meus maiores incentivadores, e às minhas irmãs, Gabrieli e Raquel, que mesmo sem saber são uma grande fonte de entusiasmo para mim.

Ao meu noivo Hamilton, por estar sempre ao meu lado, pelo apoio, dedicação e amor.

A toda minha família e à família de meu noivo Hamilton pela compreensão e apoio.

Ao meu orientador, professor Nereu Augusto Streck, pela amizade, incentivo e ensinamentos transmitidos ao longo deste caminho.

Aos professores Simone E. Teleginski Ferraz, Enio Marchezan, Sandro Luis Petter Medeiros e Arno Bernardo Heldwein pelos ensinamentos durante o curso de mestrado e pela colaboração e atenção dispensada prontamente sempre que foram solicitados.

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

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pela concessão da bolsa de estudos através do Edital MCT/CNPq n° 27/2007 - Mestrado.

A todos os colegas e amigos do Setor de Agroclimatologia, pelos conhecimentos compartilhados, pela amizade e momentos de descontração.

Enfim, a todos aqueles que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

*“Se as coisas são inatingíveis... ora!
Não é motivo para não querê-las...
Que tristes os caminhos, se não fora
A presença distante das estrelas!”*

Mário Quintana

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola
Universidade Federal de Santa Maria

SIMULAÇÃO DO RENDIMENTO DE GRÃO DE ARROZ IRRIGADO EM CENÁRIOS DE MUDANÇA CLIMÁTICA

AUTORA: LIDIANE CRISTINE WALTER

ORIENTADOR: NEREU AUGUSTO STRECK

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 18 de fevereiro de 2010.

Projeções sobre possíveis mudanças climáticas indicam que a concentração atual de CO₂ (380 ppmv) na atmosfera terrestre deverá dobrar até o final deste século, o que pode acarretar em um aumento no rendimento das culturas agrícolas pelo incremento na fotossíntese. Porém, como consequência negativa do aumento da concentração de CO₂, é esperado um aumento do efeito estufa da atmosfera e, conseqüentemente, na temperatura do ar nos próximos 100 anos, o que poderia anular os efeitos positivos do aumento da concentração de CO₂ nas culturas agrícolas. Apesar da importância da cultura do arroz irrigado no Rio Grande do Sul e no Brasil, não foi encontrado na bibliografia nenhum trabalho que avaliasse o impacto da mudança climática no rendimento de grãos para as condições e genótipos brasileiros. Assim, esta dissertação teve como objetivo simular e avaliar o impacto de cenários climáticos de aumento da concentração de CO₂ na atmosfera e aumento da temperatura do ar sobre o rendimento de grãos de arroz irrigado em Santa Maria, RS. Foram utilizados cenários sintéticos de mudança climática com 100 anos, considerando-se o dobro da quantidade de CO₂ e aumentos de temperatura do ar de +1°C, +2°C, +3°C, +4°C e +5°C. O rendimento de grãos da cultura do arroz foi simulado com o modelo InfoCrop. As simulações foram realizadas considerando um intervalo de 100 anos para três cultivares modernas de arroz (IRGA 421, IRGA 417 e EPAGRI 109) em sete datas de semeadura, com intervalos mensais, de 20 de Julho até 20 de Janeiro. O rendimento de grãos de arroz irrigado aumentou nos cenários de mudança climática para as três cultivares com maior incremento na cultivar superprecoce (IRGA 421) e menor na cultivar de ciclo longo (EPAGRI 109). Se o aquecimento global se confirmar, o período de semeadura recomendado atualmente para cultivares de arroz irrigado deverá ser ampliado.

Palavras-chaves: modelagem; aquecimento global; *Oryza sativa*; segurança alimentar.

ABSTRACT

Master of Science Dissertation
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola
Universidade Federal de Santa Maria

SIMULATING GRAIN YIELD OF IRRIGATED RICE IN CLIMATE CHANGE SCENARIOS

AUTHOR: LIDIANE CRISTINE WALTER

ADVISOR: NEREU AUGUSTO STRECK

Location and date of presentation: Santa Maria, February 18th, 2010.

Climate change projections indicate that current atmospheric CO₂ concentrations (380 ppmv) will double by the end of this century, which may lead to an increase in crop yield due to an increase in photosynthesis. However, as a negative consequence of higher CO₂ concentration, an increase in atmosphere greenhouse effect and consequent increase in air temperature is expected during the next 100 years, which might offset the positive effects of increasing CO₂ on crops. Despite the importance of rice crop in Rio Grande do Sul and in Brazil, there is no report in the literature on the impact of climate change on grain yield for Brazilian genotype and conditions. Thus, the objective of this dissertation was to simulate and evaluate the impact of elevated atmospheric CO₂ concentration and temperature increase of +1°C, +2°C, +3°C, +4°C and +5°C. Rice grain yield was simulated with the InfoCrop model. Simulations were performed considering three moderns rice cultivars (IRGA 421, IRGA 417 and EPAGRI 109) and seven sowing dates spaced monthly from 20 July to 20 January. A greater rice grain yield was obtained in the climate change scenarios for the three cultivars, with higher increase for the very early cultivar (IRGA 421) and lower increase for the late cultivar (EPAGRI 109). If global warming takes place, currently sowing period for irrigated rice it may be enlarged.

Key words: modeling, global warming, *Oryza sativa*, food security.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Série histórica do rendimento de grãos e da produção de arroz irrigado no estado do Rio Grande do Sul (RS), nas safras de 1921/22 a 2007/08, registrada pelo Instituto Riograndense do Arroz (IRGA, 2009).	16
FIGURA 2 – Diagrama esquemático do ciclo de desenvolvimento da cultura do arroz irrigado, indicando os principais estágios de desenvolvimento e as fases consideradas no modelo.	29
FIGURA 3 – Função de resposta da Eficiência do Uso da Radiação (EUR) à temperatura média diária do ar usada no modelo InfoCrop neste estudo.	30
FIGURA 4 – Rendimento de grãos de arroz irrigado simulado com o modelo InfoCrop e divulgado pelo Instituto Riograndense do Arroz nas safras de 1996/97 (1996) a 2008/09 (2008) no município de Santa Maria, RS. Os valores simulados referem-se à média de três cultivares (IRGA 421, IRGA 417 e EPAGRI 109) em três datas de semeadura (20/09, 20/10 e 20/11) e a barra representa o Erro Padrão desta média. O RQME é a raiz do quadrado médio do erro, que representa o erro médio da simulação.	40
FIGURA 5 – Rendimento de grãos de arroz irrigado simulado com o modelo InfoCrop e observado em experimentos realizados na Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, entre os anos de 1998 (safra 1998/99) e 2005 (safra 2005/06). O RQME é a raiz do quadrado médio do erro e representa o erro médio da simulação. A descrição dos experimentos está na tabela 4.	41
FIGURA 6 – Rendimento simulado pelo modelo InfoCrop versus rendimento observado em diferentes experimentos realizados na Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS e observado no município de Santa Maria catalogados pelo Instituto Riograndense do Arroz. A linha transversal é a linha 1:1.	42
FIGURA 7 – Rendimento de grãos (a), número de espiguetas (b) e porcentagem de esterilidade de espiguetas causada por frio (c) e por calor (d), simulados pelo modelo	

InfoCrop, para a cultivar IRGA 421 em sete datas de semeadura com intervalos mensais, de 20 de julho (JUL) a 20 de janeiro (JAN), e diferentes cenários climáticos, indicados no interior do painel (a). Santa Maria, RS.....	46
FIGURA 8 – Rendimento de grãos (a), número de espiguetas (b) e porcentagem de esterilidade de espiguetas causada por frio (c) e por calor (d), simulados pelo modelo InfoCrop, para a cultivar IRGA 417 em sete datas de semeadura com intervalos mensais, de 20 de julho (JUL) a 20 de janeiro (JAN), e diferentes cenários climáticos, indicados no interior do painel (a). Santa Maria, RS.....	47
FIGURA 9 – Rendimento de grãos (a), número de espiguetas (b) e porcentagem de esterilidade de espiguetas causada por frio (c) e por calor (d), simulados pelo modelo InfoCrop para a cultivar EPAGRI 109 em sete datas de semeadura com intervalos mensais, de 20 de julho (JUL) a 20 de janeiro (JAN), e diferentes cenários climáticos, indicados no interior do painel (a). Santa Maria, RS.....	48
FIGURA 10 – Disponibilidade mensal de temperatura média e densidade de fluxo de radiação solar global diária nos cenários climáticos utilizados neste estudo. A radiação solar é a mesma em todos os cenários. Os valores de temperatura do ar e radiação solar correspondem à média mensal nos 100 anos de cada cenário.	50
FIGURA 11 – Mudança média percentual no rendimento simulado de grãos de arroz irrigado em cenários de mudança climática e em sete datas de semeadura com intervalos mensais, de 20 de julho (JUL) a 20 de janeiro (JAN), indicados no painel (a), em relação ao rendimento do cenário atual (sem mudança) nas datas de semeadura recomendadas atualmente para as cultivares IRGA 421 (a), IRGA 417 (b) e EPAGRI 109 (c).	54

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Duração da fase vegetativa, em dias, de cultivares de ciclos precoce e médio, estimada pelo método de graus-dia, considerando-se a situação atual e de cenários de aumentos na temperatura média do ar em 1°C, 2°C, 3°C e 5,8°C, em seis localidades produtoras de arroz irrigado do Rio Grande do Sul. Adaptado de Steinmetz et al. (2006).....	22
TABELA 2 – Aumento na temperatura (°C) que anula os efeitos positivos do CO ₂ em diferentes regiões e dois níveis de manejo na Índia. Adaptado de Aggarwal e Mall (2002). ..	24
TABELA 3 – Fração da matéria seca alocada nas diferentes partes da planta de arroz e senescência em função do estágio de desenvolvimento da cultura usado no modelo InfoCrop. Adaptado de Bouman et al. (2004).....	32
TABELA 4 – Dados de experimentos com arroz irrigado realizados na UFSM e utilizados na avaliação do modelo InfoCrop.	36

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1 A cultura do Arroz Irrigado	15
2.2 Mudança Climática	18
2.3 Impactos da mudança climática na cultura do arroz.....	20
2.4 Simulação do rendimento de grãos das culturas agrícolas	26
3 METODOLOGIA	28
3.1 Descrição do modelo InfoCrop	28
3.2 Cenários meteorológicos de mudança climática	33
3.3 Avaliação do modelo.....	34
3.4 Simulação do rendimento em cenários de mudança climática.....	36
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
4.1 Avaliação do modelo.....	39
4.2 Rendimento de grãos de arroz irrigado em cenários de mudança climática	43
5 CONCLUSÕES	55
REFERÊNCIAS	56

1 INTRODUÇÃO

A orizicultura é um dos “carros-chefe” da economia gaúcha e o Rio Grande do Sul é o Estado responsável por mais da metade da produção brasileira de arroz. O local deste estudo (Santa Maria, RS) está situado em uma das principais regiões produtoras de arroz do Rio Grande do Sul, onde predomina o cultivo de arroz irrigado por inundação. Nos últimos anos um assunto bastante recorrente no meio científico é o aumento das emissões de gases de efeito estufa, entre eles o dióxido de carbono (CO_2), em função da grande evolução tecnológica e industrial da humanidade, dependência de combustíveis fósseis, queimadas e agricultura. Como o CO_2 é um gás de efeito estufa, o aumento de sua concentração na atmosfera terrestre implica em aumento deste efeito, que, conseqüentemente, pode resultar em incremento na temperatura do ar. Neste contexto, possíveis impactos dessa mudança climática na produção de arroz irrigado na região de Santa Maria poderão causar grandes impactos na produção estadual e certamente seriam sentidos na cadeia produtiva da cultura no Estado. Assim, a determinação do rendimento de arroz irrigado em cenários climáticos futuros é importante para prever possíveis mudanças no manejo e zoneamento da cultura, e também para indicar possíveis rumos que deve seguir o melhoramento genético na seleção de novas cultivares, de acordo com a resposta de diferentes materiais genéticos, em diferentes épocas de semeadura, frente aos cenários de mudança climática.

Para identificar alguma mudança no clima terrestre é necessário uma longa série de dados, no entanto registros instrumentais de elementos meteorológicos como temperatura do ar sobre a superfície Terrestre existem a partir de 1860. Diversos estudos já foram realizados com o objetivo de reconstruir o clima passado, com base em indicadores como anéis de árvores, cilindros de gelo e corais (MANN et al., 1998, 1999). Estes estudos apontaram uma considerável variabilidade nos dados de temperatura, radiação solar e concentração de CO_2 na atmosfera ao longo dos séculos, com anomalias ora positivas, ora negativas. No entanto, o que mais chama a atenção é a indicação de que a década de 1990 teria sido a mais quente e 1998 o ano mais quente do último milênio (MANN et al., 1999), evidenciando um aumento de temperatura nunca antes visto, que teria como principal causa as emissões de gases de efeito estufa, principalmente o CO_2 , decorrente da maior atividade antropogênica pós Revolução Industrial. Esta tendência também foi apresentada no último relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudança Climática (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON

CLIMATE CHANGE - IPCC, 2007). No entanto, a metodologia, consistência e interpretação dos dados apresentados por Mann et al. (1998) e Mann et al. (1999) foi discutida e questionada por alguns autores (McINTYRE; McKITRICK, 2003, 2005a, 2005b; Von STORCH et al., 2004).

Embora não exista total concordância entre os diferentes autores que tratam de mudança climática, em ao menos um ponto os resultados convergem para a mesma conclusão: nas últimas décadas houve aumento da concentração de CO₂ e outros gases de efeito estufa na atmosfera e a temperatura do ar aumentou em muitas regiões do Planeta (WEISS et al., 2003; KERR, 2005; IPCC, 2007; MOLION, 2008). Qual a real intensidade deste aumento na temperatura, qual a contribuição da atividade humana e das causas naturais, e quais seus impactos nos mais diversos setores, são perguntas pertinentes, e suas respostas estão frequentemente sendo investigadas pela pesquisa. Se os cenários de mudança climática previstos realmente se confirmarem no futuro, um dos setores mais afetados será a agricultura, já que as plantas são diretamente influenciadas pela temperatura do ar e concentração de CO₂ na atmosfera (TAIZ; ZEIGER, 2004).

Devido à importância do aumento da concentração de CO₂ e da temperatura sobre as espécies cultivadas, a comunidade científica tem se dedicado a estudar os possíveis impactos da mudança climática no crescimento, desenvolvimento e rendimento das culturas agrícolas e florestais. No Brasil, estudos indicam um aumento das áreas de risco climático para a cultura do arroz irrigado, devido ao aumento da temperatura do ar (GONÇALVES; ASSAD, 2009; ASSAD; PINTO, 2008; ASSAD et al., 2005) e redução da fase vegetativa do ciclo de desenvolvimento da cultura (LAGO et al., 2008) em cenários de mudança climática. No entanto, não foi encontrado na bibliografia nenhum trabalho que indicasse qual o impacto da mudança climática no rendimento de grãos de arroz irrigado nas condições brasileiras, o que constituiu o incentivo para este trabalho.

Portanto, os objetivos desta dissertação foram:

- Avaliar a possibilidade de uso de um modelo de simulação do rendimento de grãos de arroz irrigado em Santa Maria, RS;
- Simular o rendimento de grãos de arroz irrigado em cenários de mudança climática com o dobro da concentração atual de CO₂ e aumentos na temperatura média do ar em Santa Maria, RS;
- Verificar possíveis implicações nas recomendações atuais de época de semeadura.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A cultura do Arroz Irrigado

O arroz (*Oryza sativa* L.) é um dos três cereais mais produzidos e consumidos no mundo, ficando atrás apenas do trigo e do milho (UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE - USDA, 2009). Faz parte da dieta básica de aproximadamente 50% da população mundial (FAGERIA et al., 2003; LUZZARDI et al., 2005), podendo ser considerado o mais importante para a alimentação humana, pois dentre estas três culturas o arroz é a única consumida diretamente por grande parte da população mundial, enquanto o trigo e o milho são processados pela indústria ou são utilizados na alimentação animal (SHEEHY et al., 2007).

No Brasil são cultivados anualmente cerca de 2,9 milhões de hectares com arroz (USDA, 2009), dos quais 1,3 milhões de hectares são de várzeas, onde é cultivado arroz irrigado por inundação (FAGERIA et al., 2003). O Brasil é o maior produtor de arroz fora da Ásia, e o volume da produção Brasileira representa cerca de 2% da produção mundial e 56% da produção da América do Sul (USDA, 2009). A região Sul do Brasil (RS, SC e PR) é a principal produtora, com cerca de 70% do total produzido no País. O Rio Grande do Sul (RS) é o maior produtor Nacional, representando 60% do arroz irrigado colhido no País (INSTITUTO RIO GRANDENSE DO ARROZ - IRGA, 2009). Atualmente a média do rendimento de grãos de arroz irrigado no estado do RS é de aproximadamente 7,28 Mg ha⁻¹ (IRGA, 2009), bem acima da média Brasileira (4,34 Mg ha⁻¹), que é superior à média mundial de 4,25 Mg ha⁻¹ (USDA, 2009). A Depressão Central do RS, onde está situado o município de Santa Maria, é uma das principais regiões produtoras de arroz irrigado no estado, sendo a segunda região do RS em volume de produção (IRGA, 2009).

Na série histórica de registros do IRGA (IRGA, 2009) para o estado do RS, pode-se observar que o rendimento de grãos de arroz irrigado teve um aumento considerável desde o início dos registros em 1921, que se refletiu no aumento do volume de produção do estado do RS (Figura 1). O aumento do volume de produção de arroz observado no RS na série histórica apresentada ocorreu em função do aumento da área cultivada e do rendimento de grãos de arroz no estado. O rendimento de grãos aumentou com a introdução das cultivares do tipo

moderno no final da década de 1970, cujas plantas possuem como características morfológicas baixa estatura e folhas eretas, entre outras, que lhes conferem um alto potencial produtivo. Além da adoção das novas cultivares, mais produtivas, o aumento no rendimento de grãos ao longo da série de dados também pode ser atribuído ao aprimoramento das práticas de manejo realizadas nas lavouras, como data de semeadura mais adequada, aumento no uso de defensivos agrícolas e adubação, e maior controle de plantas daninhas, principalmente o arroz vermelho.

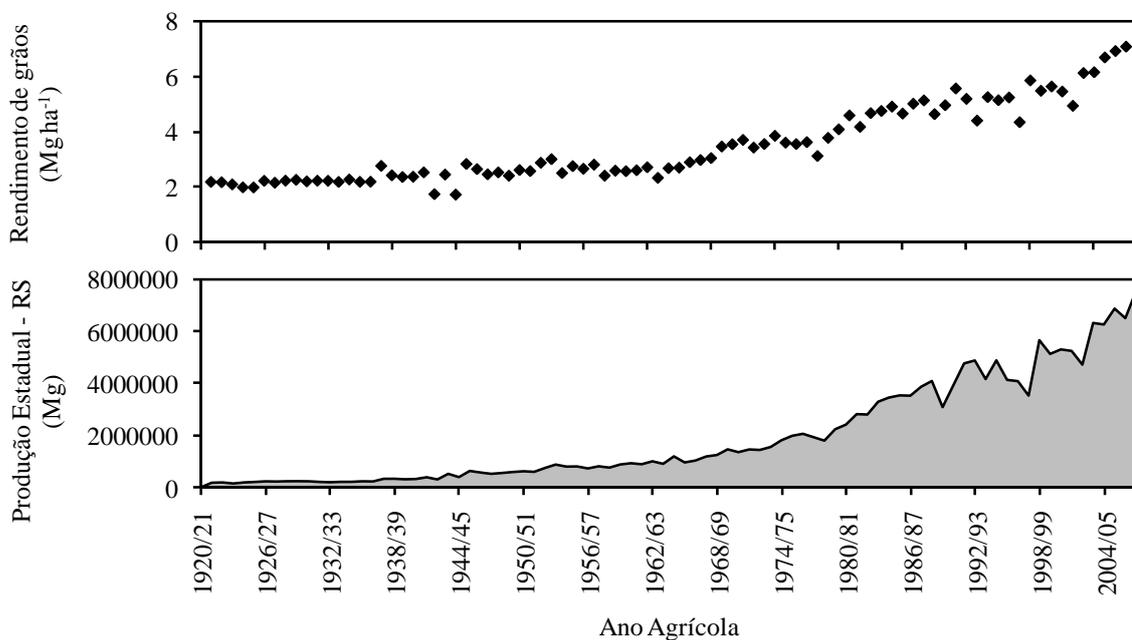


Figura 1 – Série histórica do rendimento de grãos e da produção de arroz irrigado no estado do Rio Grande do Sul (RS), nas safras de 1921/22 a 2007/08, registrada pelo Instituto Riograndense do Arroz (IRGA, 2009).

Apesar dos níveis crescentes de produtividade da cultura do arroz no Rio Grande do Sul, causados pelo aprimoramento das técnicas agrônômicas, há uma considerável variabilidade interanual no rendimento de grãos devida, principalmente, às condições meteorológicas ao longo dos anos nas diferentes regiões produtoras. As variações da temperatura do ar e da radiação solar, durante as fases críticas da planta, são os principais elementos climáticos relacionados com esta variabilidade de produtividade (SOCIEDADE SUL BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO - SOSBAI, 2007).

A data de semeadura é um dos fatores mais importantes para obtenção de alta produtividade, pois a recomendação dos períodos mais favoráveis para a semeadura é baseada em critérios que fazem com que as fases críticas do desenvolvimento da planta coincidam com as condições ambientais mais favoráveis. O período recomendado para a semeadura do arroz irrigado na região de Santa Maria é entre 01 de outubro e 10 de dezembro, variando em função do ciclo da cultivar (SOSBAI, 2007). Para as cultivares de ciclo longo o período preferencial para a semeadura é curto, ficando entre 01 e 30 de outubro e, para as cultivares de ciclo médio, o período favorável se estende até 20 de novembro. As cultivares de ciclo precoce podem ser semeadas a partir de 11 de outubro até 30 de novembro, e para cultivares muito precoces o período preferencial é entre 11 de outubro e 30 de dezembro. Assim, quanto mais longo o ciclo da cultivar, mais cedo ela deve ser semeada e menor é o período favorável para a semeadura. Dados do IRGA (IRGA, 2005) mostram que na safra 2004/05 mais de 50% da área foi semeada entre a segunda quinzena de outubro e a primeira quinzena de novembro.

O sistema de cultivo do solo mais utilizado na cultura do arroz irrigado no estado do Rio Grande do Sul é o sistema de cultivo mínimo (SOSBAI, 2007) que se caracteriza por uma menor mobilização do solo quando comparado ao sistema convencional. O estado se caracteriza pelo cultivo de grandes áreas de arroz, onde predomina amplamente o sistema de cultivo com taipas em nível e uma parcela de 19% das lavouras do RS com sistematização do solo. A entrada da água na lavoura acontece quando a planta tem de 3 a 5 folhas visíveis. A água é colocada no ponto mais alto da área e se distribui por gravidade, mantendo-se uma lâmina de água contínua através de taipas construídas com diferença de nível de 5 a 10 cm. A área deve permanecer inundada até os estágios R6-R7 da escala de Counce (COUNCE et al., 2000), quando é feita a supressão da irrigação para drenagem da área (SOSBAI, 2007).

A cultivar mais utilizada no RS entre as safras 2002/03 e 2004/05 foi a cultivar IRGA 417, correspondendo a 27% da área cultivada (IRGA, 2005). A cultivar IRGA 417 tem grande aceitação, tanto pelos produtores, por suas ótimas características agrônômicas, quanto pela indústria, pelo alto rendimento de engenho.

A cultivar IRGA 421 tem como principal característica a precocidade, atributo que auxilia no manejo de áreas com incidência de arroz vermelho, pois esta cultivar tem colheita anterior à maturação desta invasora que em geral possui ciclo médio (STRECK et al., 2008a). Em anos em que ocorrem atrasos na época da semeadura esta cultivar é muito utilizada, pois completa rapidamente a fase vegetativa de modo que a antese ocorre quando as temperaturas mínimas do ar ainda não são baixas, o que não acontece com as outras cultivares com semeaduras em dezembro (STRECK et al., 2006).

As cultivares de ciclo longo, como a EPAGRI 109, têm como característica alto potencial produtivo, em função da sua maior fase vegetativa que permite uma maior produção de fotoassimilados e, conseqüentemente, maior produtividade (STRECK et al., 2006).

2.2 Mudança Climática

A partir da revolução industrial, em meados do século XVIII, a humanidade passou por uma série de mudanças tecnológicas com profundo impacto no processo produtivo em nível econômico e social. Ao longo desse processo a máquina progressivamente passou a executar trabalhos até então realizados somente pelo homem. Em razão desta mudança no meio produtivo, houve aumento da emissão de gases de efeito estufa como dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O) na atmosfera terrestre. Assim as concentrações destes gases aumentaram bastante em conseqüência das atividades antropogênicas desde 1750 e agora ultrapassam em muito os valores pré-industriais (IPCC, 2007).

O efeito estufa é um processo natural da atmosfera terrestre, em que parte da radiação de ondas longas emitida pela superfície terrestre é absorvida pelos gases de efeito estufa existentes na atmosfera, e posteriormente emitida por estes gases, também na forma de ondas longas, em todas as direções, incluindo a superfície terrestre. Este processo é fundamental para a manutenção da temperatura e conseqüentemente da vida no planeta. No entanto, o aumento da concentração dos gases de efeito estufa pode intensificar este processo, desestabilizando o equilíbrio energético e originando o fenômeno conhecido como aquecimento global. Os principais gases responsáveis pelo efeito estufa são o vapor d'água (H_2O), o CO_2 , o CH_4 e o N_2O . Várias atividades humanas contribuem para o aumento da concentração destes gases na atmosfera, principalmente pelo uso de combustíveis fósseis, nas queimadas e na agricultura. Destes três gases estufa, o CO_2 é o mais comentado e tem maior importância relativa nos debates por estar em uma concentração maior na atmosfera (partes por milhão) em comparação com os outros dois (partes por bilhão) e pelo longo período de permanência na atmosfera (até 100 anos) (ROSENBERG et al., 1983).

Do início da era industrial até a atualidade, a concentração de CO_2 na atmosfera aumentou em média de 280 ppm para aproximadamente 380 ppm (MANN et al., 1998; IPCC,

2007). Uma forma de medir a evolução da concentração de CO₂ nos últimos mil anos é por meio de análises das bolhas de ar contidas em testemunhos de gelo na Antártica, onde se destaca o forte aumento da concentração de CO₂ no século XX (MANN et al., 1998; MANN et al., 1999). Atualmente a taxa de aumento da concentração de CO₂ é da ordem de 1,9 ppmv por ano (IPCC, 2007). Com isso espera-se que a atual concentração venha a duplicar em algum momento deste século (STRECK, 2005), podendo acarretar vários efeitos sobre as atividades humanas, incluindo a agricultura.

Como resultado do aumento da concentração de CO₂ atmosférico assume-se que está aumentando o efeito estufa da atmosfera terrestre, podendo levar ao aquecimento global (ROSENBERG et al., 1983; IPCC, 2007). Há indicadores de que a década de 1990 teria sido a mais quente do último milênio (MANN et al., 1999; KERR, 2005). Mann et al. (1999), reconstruindo as temperaturas do último milênio através de diversos indicadores ambientais em todo planeta, encontraram resultados que sugerem anomalias positivas de 0,8°C na temperatura média do século 20, especialmente na década de 90 que teve o ano de 1998 como o mais quente do milênio. Esses resultados foram impactantes na época, inclusive sendo usados pelo IPCC no relatório de 2001 (IPCC, 2001), mas passaram a ser questionados e criticados por McIntyre e McKittrick (2003; 2005a,b) que tiveram acesso a parte do banco de dados destes trabalhos e encontraram erros de cálculo que afetaram o índice de temperatura. Estes últimos autores não discordam do aumento da temperatura média do ar citada por Mann et al. (1998; 1999), mas demonstram que no início do século 15 houve anomalias positivas na temperatura média do ar, indicando que o aumento de temperatura nas últimas décadas não é um fato inédito, como afirmaram Mann et al. (1999).

No Brasil, Gonçalves e Assad (2009) ao analisar séries históricas de diversas estações meteorológicas de todo o Brasil, encontraram um aumento significativo nas temperaturas mínimas do ar em todas as regiões do país, com maior impacto na região Norte, onde se observa tendência de aumento de 0,5°C por década. Para a região Sul o acréscimo na temperatura mínima do ar foi de 0,2°C por década (GONÇALVES; ASSAD, 2009). Para o estado de Santa Catarina, Back (2001) identificou uma tendência significativa de aumento na temperatura média anual na série histórica de 1924 a 1998, da estação meteorológica de Urussanga (latitude 28°31' S, longitude 49°19' W e altitude de 48,2 m).

Estudos numéricos com modelos de circulação geral da atmosfera (GCM - General Circulation Models) indicam que é bastante provável que se verifique um aumento de 1 a 6°C na temperatura média do ar até o final do século XXI em vários locais do Planeta (MAHLMAN, 1997; IPCC, 2007), incluindo o Brasil (SIQUEIRA et al., 1994, 2000, 2001;

ASSAD et al., 2004). As conclusões do Grupo de Trabalho I para o Quarto Relatório de Avaliação do IPCC (IPCC, 2007) prevêem um aumento de 1 a 6°C na temperatura média global até o ano de 2100. Para a região Sul do Brasil este relatório prevê aumentos de 1,5°C (no cenário mais otimista) a 5,5°C (no cenário mais pessimista) até 2100. Outros elementos meteorológicos como precipitação, nebulosidade, radiação solar incidente e evaporação apresentam tendências variáveis em função da escala (global ou regional) em que as séries meteorológicas são analisadas e os modelos são aplicados (HULME et al., 1994; THOMAS, 2000).

2.3 Impactos da mudança climática na cultura do arroz

O efeito direto do incremento na concentração de CO₂ no desenvolvimento das plantas é a possibilidade de aumento da taxa de crescimento e da produtividade das culturas no futuro, uma vez que o CO₂ é o substrato primário para a fotossíntese (ROSENBERG et al., 1983; TAIZ; ZEIGER, 2004; STRECK, 2005). No entanto, esse aumento da concentração de CO₂ pode causar uma elevação na temperatura do ar, que, segundo projeções do último relatório do IPCC, podem chegar a 6,4°C até o final deste século (IPCC, 2007). Um aumento na temperatura do ar pode reduzir ou anular os efeitos benéficos do CO₂ sobre as plantas (STRECK, 2005). A mudança climática, segundo Aggarwal e Mall (2002), ainda pode causar efeitos indiretos na produção das culturas, como alterações na disponibilidade de água para a irrigação, competição com pragas, doenças e invasoras, alterações na fertilidade do solo e erosão.

Plantas com metabolismo C₃, como o arroz, são mais beneficiadas pelo aumento da concentração de CO₂ atmosférico do que plantas com metabolismo C₄ (TUBIELLO et al., 2000; SIQUEIRA et al., 2001; STRECK, 2005). Plantas com metabolismo C₄, devido a modificações morfofisiológicas no aparato fotossintético, utilizam com eficiência o CO₂ presente no ar atmosférico nas concentrações atuais. Resultados experimentais que mostram aumento na biomassa seca e rendimento comercial de algumas culturas em resposta ao dobro da concentração do CO₂ são apresentados por Streck (2005). O aumento varia de acordo com a cultura, sendo que o incremento médio é de 23%, 32%, 42%, 54% e 52% para frutas, cereais C₃, folhosas, legumes e raízes, respectivamente.

Em um estudo de três anos conduzido sob condições de ambiente controlado na China, aplicando 200 ppm de CO₂ acima da concentração ambiente Yang et al. (2006) encontraram um incremento na produção de matéria seca (MS) que levou a um aumento médio de 13% no rendimento de grãos. O incremento na MS variou com o estágio de desenvolvimento da cultura, com uma tendência de redução no incremento à medida que a cultura avança no seu desenvolvimento. Quanto à distribuição da MS, com o aumento do CO₂ houve uma redução significativa na fração da MS das folhas, e aumento na fração da MS dos colmos. O incremento final da biomassa foi maior do que o incremento no rendimento de grãos.

No entanto, se o aumento da concentração de CO₂ for acompanhado de aumento da temperatura do ar, poderá não haver aumento no crescimento e produtividade das culturas devido ao encurtamento do ciclo (WIEGAND; CUELLAR, 1981; SIONIT et al., 1987; HUNT et al., 1991; BUTTERFIELD; MORISON, 1992; SHAYKEWICH, 1995, SIQUEIRA et al., 2001) e aumento da respiração (ROSENBERG et al., 1983; LONG, 1991; VU et al., 1997; TAIZ; ZEIGER, 2004), ou seja, as plantas consumiriam mais energia durante a respiração, reduzindo a quantidade de fotoassimilados disponíveis para os órgãos de reserva da planta durante o enchimento de grãos.

Em cenários de mudança climática para a China, com incremento de CO₂ e temperatura, Tao et al. (2008) reportam 100% de probabilidade de diminuição do ciclo de crescimento e da produtividade com aumento de temperatura, diminuições essas tanto maiores quanto maior o aumento da temperatura média do ar. Estes resultados concordam com os relatados por Lago et al. (2008) no Brasil, para diferentes fases de desenvolvimento de diferentes cultivares de arroz irrigado, em cenários com aumentos simétricos e assimétricos na temperatura do ar (de 1 a 5°C) utilizando um modelo não linear para simular o desenvolvimento da cultura. Os últimos autores reportam uma diminuição da fase vegetativa (emergência – diferenciação do primórdio floral) nos cenários com aumento simétrico e assimétricos na temperatura do ar, com as cultivares de origem *indica* sendo mais sensíveis que os de origem *japonica* e os biótipos de arroz vermelho. A resposta da duração total do ciclo (emergência – maturidade fisiológica) foi dependente do aumento simétrico e assimétrico da temperatura, sendo os desvios de até oito dias. A diminuição do ciclo total dos biótipos de arroz vermelho em quase todos os cenários de mudança climática pode ser um indício de aumento da competitividade dessa importante planta daninha da cultura do arroz no RS, mostrando sua alta plasticidade e adaptabilidade.

Em outro trabalho realizado no Brasil, Steinmetz et al. (2006) estudaram o impacto da mudança climática sobre a duração da fase vegetativa do arroz irrigado para algumas das

principais regiões produtoras do Rio Grande do Sul. Utilizando o método de Graus-dia com temperatura base de 11°C, os autores encontraram diminuições progressivas na duração da fase vegetativa com o aumento da temperatura do ar, à medida que a data de emergência avança (Tabela 1). Isso pode implicar em diminuição do perfilhamento, diminuição do número de folhas e conseqüentemente menor produtividade da cultura.

Tabela 1 – Duração da fase vegetativa, em dias, de cultivares de ciclos precoce e médio, estimada pelo método de graus-dia, considerando-se a situação atual e de cenários de aumentos na temperatura média do ar em 1°C, 2°C, 3°C e 5,8°C, em seis localidades produtoras de arroz irrigado do Rio Grande do Sul. Adaptado de Steinmetz et al. (2006).

Local	Data de emergência	Duração da fase vegetativa (dias)									
		Ciclo Precoce					Ciclo Médio				
		Atual	+1°C	+2°C	+3°C	+5,8°C	Atual	+1°C	+2°C	+3°C	+5,8°C
Cachoeirinha	10/10	50	46	43	40	33	58	54	50	47	39
	10/11	42	40	37	34	30	50	47	44	41	35
	10/12	38	36	33	32	28	-	-	-	-	-
Pelotas	10/10	-	-	-	-	-	70	60	55	50	44
	10/11	50	47	43	40	33	59	55	51	47	39
	10/12	43	40	37	35	30	-	-	-	-	-
Santa Maria	10/10	53	49	45	42	35	61	57	53	49	41
	10/11	44	41	38	36	31	52	49	45	42	36
	10/12	38	36	34	32	28	-	-	-	-	-
Santana do Livramento	10/10	-	-	-	-	-	69	60	55	50	40
	10/11	49	46	42	39	33	58	53	50	47	39
	10/12	42	39	36	34	29	-	-	-	-	-
Santa Vitória do Palmar	10/10	-	-	-	-	-	77	67	61	55	43
	10/11	54	50	46	43	35	64	59	54	50	42
	10/12	46	43	39	37	31	-	-	-	-	-
Uruguaiana	10/10	51	48	44	41	34	59	55	52	48	40
	10/11	41	38	36	34	30	48	45	43	41	35
	10/12	35	34	32	30	27	-	-	-	-	-

Na China, Tao et al. (2006) identificaram que a elevação da temperatura observada entre 1981-2000 afetou a fenologia e o rendimento de grãos de diferentes culturas, incluindo o arroz, resultando em redução na produtividade. O aumento da temperatura máxima implicou

em maior esterilidade de espiguetas no arroz e o aumento da temperatura mínima em aumento da taxa de respiração noturna e, conseqüentemente, em consumo de biomassa.

Para as condições do noroeste da Índia, Lal et al. (1998) avaliaram a vulnerabilidade da cultura do arroz às futuras mudanças no clima, utilizando o modelo CERES. Nesta região está previsto que, até a metade do século XXI, em função do aumento na concentração de CO₂ atmosférico de 330 para 660 ppm, ocorra aumento de 1 a 2°C na temperatura média diária do ar e redução de 0,5 mm dia⁻¹ na precipitação. Os efeitos positivos do dobro da concentração de CO₂ no rendimento do arroz seriam anulados com aumento de apenas 2°C na temperatura do ar.

Ainda na Índia, os efeitos da mudança climática na cultura do arroz foram estudados por Aggarwal e Mall (2002) também através de modelos matemáticos, considerando incrementos graduais de CO₂ e temperatura, sob diferentes doses de nitrogênio. Similarmente aos demais trabalhos, estes autores encontraram aumento no rendimento de grãos do arroz com maior concentração de CO₂ na atmosfera, e este efeito positivo foi anulado quando o aumento da temperatura do ar foi considerado no estudo. Na Tabela 2 estão os valores do incremento de temperatura do ar que são necessários para anular os efeitos positivos do CO₂ sobre a produtividade do arroz, em diferentes locais da Índia (AGGARWAL; MALL, 2002). Em regiões onde as doses de nitrogênio utilizadas são insuficientes para suprir as necessidades da cultura, a maior concentração de CO₂ na atmosfera não terá um grande efeito no rendimento de grãos de arroz. Isto ocorre porque há diminuição da fotossíntese devido à menor quantidade de N, que é o principal constituinte dos cloroplastos (TAIZ; ZEIGER, 2004).

Na Tabela 2 pode-se observar que o aumento de temperatura para anular os efeitos positivos do aumento de CO₂ varia com a concentração de CO₂ atmosférico, com o local e com o nível de manejo da lavoura arrozeira, variando de 0,9°C no Oeste e Sul da Índia, com concentração de CO₂ de 450 ppm a >5°C no Leste e Norte da Índia com concentração de CO₂ de 650 ppm. Chama a atenção nos dados da Tabela 2 o fato do “Manejo Melhorado”, que representa uma possível mudança tecnológica na cadeia produtiva do arroz na Índia, alterar o aumento de temperatura que anula os efeitos benéficos do aumento do CO₂ de forma diferente, dependendo da região de cultivo, ora sendo maior do que o nível de manejo atual (Sul da Índia), ora sendo menor (Norte, Leste e Oeste da Índia). Estes resultados reforçam a existência de interação entre um grande número de fatores que afetam a produtividade das culturas agrícolas, no caso a cultura do arroz, indicando alta vulnerabilidade dos ecossistemas

agrícolas à mudança climática, em que soluções e práticas de mitigação devem ser consideradas sitio-específicas.

Tabela 2 – Aumento na temperatura (°C) que anula os efeitos positivos do CO₂ em diferentes regiões e dois níveis de manejo na Índia. Adaptado de Aggarwal e Mall (2002).

Local	Nível de Manejo*	Concentração de CO ₂		
		450 ppm	550 ppm	650 ppm
<i>Norte da Índia</i>	Melhorado	1,7	3,2	>5,0
	Atual	1,9	2,7	4,8
<i>Leste da Índia</i>	Melhorado	1,2	1,5	>5,0
	Atual	2,0	4,4	>5,0
<i>Oeste da Índia</i>	Melhorado	0,9	1,8	2,8
	Atual	1,0	2,1	3,4
<i>Sul da Índia</i>	Melhorado	1,0	2,3	4,4
	Atual	0,9	2,0	3,4

*O nível de manejo Atual refere-se à aplicação de 150 kg N ha⁻¹, fracionada em três momentos e irrigações frequentes, uma prática comum em arroz irrigado na Índia. O nível Melhorado simula um manejo de produção potencial daqui a algumas décadas, considerando o provável desenvolvimento econômico e tecnológico da agricultura.

Simulando o impacto de cenários de mudança climática em arroz irrigado na China, Yao et al. (2007) e Tao et al. (2008) observaram que o decréscimo da produção de arroz em cenários de aumento de CO₂ e temperatura variou em função da localização geográfica e com as cultivares. Matthews et al. (1997) investigaram os efeitos de diferentes cenários de mudança climática em diferentes regiões da Ásia, utilizando dois modelos de simulação de rendimento do arroz (ORYZA1 e SIMRIW), variando a concentração de CO₂ de 340 ppm para 680 ppm, e aumentos de temperatura do ar de +1, +2 e +4°C. Considerando apenas aumentos na concentração de CO₂ houve, em média, aumentos de 23,9% e 36,4% na produtividade do arroz com os dois modelos utilizados. Quando o aumento na temperatura do ar foi incluído houve um declínio no rendimento até chegar, em média, a uma redução de 7,0% e 8,5% com aumento de 4°C na temperatura. No entanto, estes valores são a média de todos os locais da Ásia, mas os resultados variaram de local para local. Os autores descrevem

que as diferenças entre as regiões ocorreram principalmente pela diferença na quantidade de dias com temperaturas acima da ótima entre os locais, resultando em maior ou menor efeito sobre a esterilidade de espiguetas e sobre a duração do ciclo de desenvolvimento das cultivares.

As altas temperaturas que ocorrem em regiões tropicais contribuem para a redução do rendimento de grãos pela diminuição do período vegetativo da cultura e aumento na esterilidade de espiguetas na fase de emergência da panícula (PENG et al., 1995). Algumas soluções para minimizar os efeitos negativos no rendimento de arroz são sugeridas por Matthews et al. (1997), como o ajustamento das datas de semeadura, de acordo com o local. Por exemplo, nos locais em que os verões são mais quentes a semeadura deverá ser atrasada, a fim de evitar altas temperaturas no período do florescimento. Já em locais de altas latitudes (39,9°N), onde os verões são mais amenos, o aumento na temperatura do ar tornaria possível a antecipação da data de semeadura, possibilitando dois cultivos por ano. Em um estudo similar, Krishnan et al. (2007) também encontraram melhores rendimentos com o atraso na data de semeadura de arroz irrigado, em locais de latitudes entre 20 e 26°N. Outra medida é a seleção de cultivares com maior tolerância às temperaturas elevadas, visando diminuir a esterilidade de espiguetas.

Para entender-se o efeito da mudança climática na esterilidade de espiguetas em arroz, os resultados de Matsui et al. (1997a), em câmaras de crescimento, são de interesse pois foram considerados dois níveis de CO₂ (ambiente e +300 ppm) e dois níveis de temperatura (ambiente e +4°C). Os resultados indicam que considerando somente o incremento de CO₂, não houve efeito significativo na esterilidade de espiguetas, pois o CO₂, isoladamente, proporciona um maior número de perfilhos produtivos, tendo pouco efeito na esterilidade das espiguetas. Em relação à temperatura, a antese é a fase mais sensível às temperaturas elevadas, e a temperatura crítica, acima da qual a esterilidade de espiguetas começa a aumentar, ficou entre 33 e 34°C. Quando essa temperatura crítica é ultrapassada, mesmo por poucas horas, ocorre uma grande esterilidade de espiguetas, devido à menor deposição de grãos de pólen, e em temperaturas extremas (>40°C) ocorre esterilidade dos órgãos femininos da flor. Embora o efeito isolado do CO₂ não tenha sido significativo, a esterilidade de espiguetas foi maior no tratamento com temperatura e CO₂ elevados, do que, apenas elevada temperatura, o que sugere um efeito de aumento da temperatura da planta em função do controle estomático no ambiente enriquecido com CO₂, pois níveis elevados de CO₂ atmosférico tendem a reduzir a abertura estomática nas folhas (MATSUI et al., 1997a).

2.4 Simulação do rendimento de grãos das culturas agrícolas

Análises de impacto do tempo meteorológico e do clima sobre a agricultura, durante longas séries de anos, são importantes nos níveis regional, estadual e nacional, por sua consequência social e econômica. No entanto estudos do impacto da mudança climática sobre o desempenho de agroecossistemas são difíceis de serem realizados experimentalmente, devido à limitação de equipamentos, mão-de-obra e recursos financeiros (ANDRESEN et al., 2001). Além disso, há dificuldade no controle de alguns fatores em experimentos e as respostas das plantas são afetadas por condições meteorológicas que variam no espaço e no tempo, ou seja, são diferentes de um local para outro e, em um mesmo local, variam a cada dia.

Modelos matemáticos são uma simplificação da realidade que nos permitem descrever as complicadas interações que existem em agroecossistemas e, assim, tornam possível o estudo do impacto de mudanças nos elementos meteorológicos e no clima sobre agroecossistemas. Existem vários modelos de simulação de rendimento das culturas agrícolas disponíveis na bibliografia, desde os mecanísticos de elevada complexidade e número de coeficientes (STAPPER; HARRIS, 1989) até modelos empíricos simples (MONTEITH; SCOTT, 1982). Os modelos matemáticos devidamente adaptados e testados em diferentes ambientes são ferramentas que permitem descrever as interações entre a planta ou cultura e o ambiente, e podem ser usados em estudos dos efeitos de possíveis mudanças climáticas em atividades agrícolas. Existem vários modelos de simulação do rendimento de grãos de arroz, alguns mais complexos como o CERES-rice (SINGH et al., 1993) e o ORYZA1 (KROPFF et al., 1994), e outros com algumas simplificações, principalmente na maneira de calcular a produção de matéria seca na planta, que facilitam sua utilização, como o InfoCrop (AGGARWAL et al., 2006a) e o WARM (CONFALONIERI et al., 2009). O modelo InfoCrop (AGGARWAL et al., 2006a) é um modelo mecanístico, genérico, desenvolvido para simular efeitos do clima, do solo, de manejo da cultura, de danos das principais pragas e doenças, além de quantificar o impacto ambiental de agroecossistemas, através do cálculo da emissão de gases de efeito estufa. Os modelos InfoCrop e ORYZA1 foram utilizados por Krishnan et al. (2007) na simulação do rendimento de grãos de arroz irrigado em cenários de mudança climática na Índia, comparando-se a performance destes dois modelos neste estudo observa-se que o modelo InfoCrop apresentou melhor desempenho, com menor erro na

simulação. Este modelo é de simples aplicação e requer dados de entrada facilmente disponíveis para sua utilização, podendo, portanto ser utilizado neste estudo de simulação do rendimento de arroz irrigado.

Estudos do impacto das mudanças climáticas na agricultura do Brasil têm aumentado nos últimos anos e estimativas de rendimento através de modelos matemáticos têm sido obtidas em diversas regiões para diferentes culturas (SIQUEIRA et al., 1994, 2000, 2001; STRECK; ALBERTO, 2006). Para as culturas de trigo, soja e milho, Siqueira et al. (2000) realizaram uma simulação através da modelagem para diferentes regiões do país, encontrando redução de 31% e 16% na produção de trigo e milho, respectivamente, projetada para o ano de 2050 aproximadamente, no entanto, para a cultura da soja, observaram um aumento na produção de grãos em torno de 27%. Para a região de Santa Maria, RS, Streck e Alberto (2006) realizaram um estudo do impacto do possível aquecimento global e concluíram que a mudança climática projetada pela simulação para os próximos 100 anos influenciará no rendimento destas culturas. Segundo os últimos autores o aumento de 2, 3 e 6°C na temperatura do ar pode anular os efeitos benéficos do aumento de CO₂ no rendimento das culturas de trigo, soja e milho, respectivamente. Para a cultura do arroz irrigado, Lago et al. (2008) simulou o desenvolvimento vegetativo em Santa Maria, RS, e encontrou que a duração da fase vegetativa, em geral, diminuiu com o aumento da temperatura nos cenários de mudança climática.

Apesar de ser o maior produtor de arroz fora da Ásia (USDA, 2009), no Brasil ainda existem poucos trabalhos de pesquisa referentes à influência da mudança climática na cultura do arroz. Alguns fatores contribuem para esta situação, como: necessidade de altos investimentos em pesquisas de campo, poucos pesquisadores dominarem a modelagem e pelo interesse relativamente novo por esta linha de pesquisa no Brasil. Apesar dos modelos matemáticos serem sempre uma simplificação da realidade, podem ser uma ferramenta útil para estimativa do rendimento das culturas agrícolas em cenários de mudança climática, em função do baixo custo envolvido nestes estudos de simulação e pelos resultados satisfatórios que os modelos existentes vem apresentando em diferentes locais do planeta. Neste sentido, os resultados de estudos numéricos com modelos matemáticos constituem contribuições importantes do ponto de vista científico pois possibilitam simular o rendimento das culturas agrícolas em cenários futuros com baixo custo e boa confiabilidade.

3 METODOLOGIA

3.1 Descrição do modelo InfoCrop

O modelo de simulação do rendimento de grãos de arroz usado neste estudo é o modelo InfoCrop (AGGARWAL et al., 2006a), um modelo de simulação mecanístico, que pode ser utilizado para diversos fins, inclusive a simulação dos efeitos de possíveis mudanças climáticas sobre o rendimento de grãos das culturas agrícolas. O fluxograma do modelo é apresentado no ANEXO A. Este modelo de simulação do rendimento foi desenvolvido e avaliado para as condições Asiáticas, na Índia, utilizando cultivares locais. Por isso precisou de alguns ajustes para a simulação do rendimento de grãos nas condições de Santa Maria, RS, Brasil. Alguns coeficientes não são disponíveis para as condições e cultivares locais, neste caso os coeficientes utilizados nas simulações são os originais do modelo, descritos por Bouman et al. (2004).

O modelo utiliza o conceito de soma térmica para a simulação do desenvolvimento da cultura e a duração de cada uma das fases considerada é controlada pelo tempo térmico necessário para completar cada fase. No modelo original o ciclo da cultura é dividido em três fases: fase de emergência (semeadura-emergência), fase vegetativa (emergência-antese) e fase reprodutiva (antese-maturidade fisiológica). No entanto, Lago (2008) propõe uma divisão a mais no ciclo de desenvolvimento da cultura (Figura 2), pela inclusão do estágio de diferenciação do primórdio floral, o qual é importante no manejo da cultura, já que é neste momento que se recomenda a aplicação da segunda parcela da adubação nitrogenada, em função do componente do rendimento número de grãos por panícula ser definido neste momento do ciclo (SOSBAI, 2007). Assim, o modelo foi adaptado para considerar quatro fases do ciclo de desenvolvimento da cultura: fase de emergência (semeadura-emergência), fase vegetativa (emergência-diferenciação do primórdio floral), fase reprodutiva (diferenciação do primórdio floral-antese) e fase de enchimento de grãos (antese-maturidade fisiológica).

O cálculo da soma térmica foi realizado segundo metodologia utilizada por Lago (2008) e acumulada diariamente (Soma Térmica acumulada, STa), baseada na temperatura

mínima e máxima diária do ar e considerando as três temperaturas cardinais do desenvolvimento da cultura, temperatura base inferior (T_b – abaixo da qual a planta não se desenvolve), temperatura ótima (T_{ot} – em que o desenvolvimento é máximo) e temperatura base superior (T_B – acima da qual a planta não se desenvolve) variando de acordo com a fase de desenvolvimento, ao longo do ciclo da cultura, sendo $T_b=11^\circ\text{C}$, $T_{ot}=30^\circ\text{C}$ e $T_B=40^\circ\text{C}$ para a fase de emergência e para a fase vegetativa; $T_b=15^\circ\text{C}$, $T_{ot}=25^\circ\text{C}$ e $T_B=35^\circ\text{C}$ para a fase reprodutiva; $T_b=15^\circ\text{C}$, $T_{ot}=23^\circ\text{C}$ e $T_B=35^\circ\text{C}$ para a fase de enchimento de grãos.

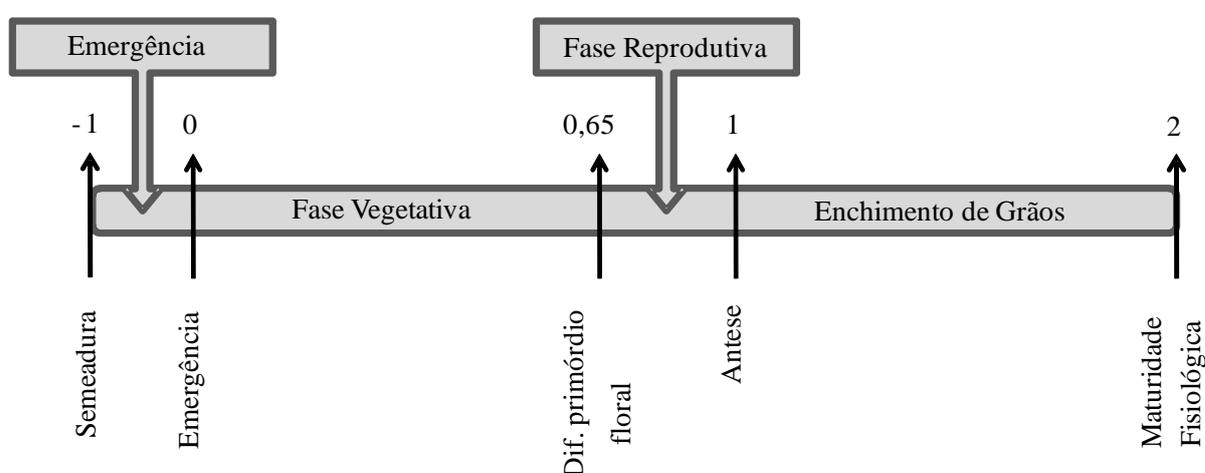


Figura 2 – Diagrama esquemático do ciclo de desenvolvimento da cultura do arroz irrigado, indicando os principais estágios de desenvolvimento e as fases consideradas no modelo.

A duração das fases do ciclo de desenvolvimento das três cultivares utilizadas, em graus dias, foi calculada por Lago (2008), em uma série de experimentos conduzidos durante quatro anos agrícolas, no mesmo local do presente trabalho. Quando a STa calculada atingia o valor da duração de cada fase descrita por Lago (2008), considerou-se que a fase estava completa. O estágio de desenvolvimento da cultura foi calculado diariamente, de modo que a fase de emergência compreendesse os estágios de -1 (semeadura) até 0 (emergência), a fase vegetativa inicia no estágio 0 e termina no estágio 0,65 (diferenciação do primórdio floral), a fase reprodutiva inicia no estágio 0,65 e termina no estágio 1 (antese), e a fase de enchimento de grãos corresponde ao período entre os estágios 1 e 2 (maturidade fisiológica), como pode ser visualizado na Figura 2.

A fase vegetativa (emergência – antese) é considerada como o período em que a cultura do arroz irrigado tem sensibilidade ao fotoperíodo. No modelo InfoCrop, dependendo do fotoperíodo e da sensibilidade da cultivar utilizada ao fotoperíodo, calcula-se um fator de correção para a soma térmica desta fase (AGGARWAL et al., 2006a). Nesta simulação não foi considerado o efeito do fotoperíodo sobre o desenvolvimento pois desconhece-se os coeficientes de sensibilidade destas cultivares e porque Lago (2008) não considerou efeito do fotoperíodo sobre a fenologia destas cultivares.

A produção de matéria seca na planta é calculada como uma função da Eficiência do Uso da Radiação (EUR) e do Índice de Área Foliar (IAF) relacionando a radiação solar interceptada com o crescimento das plantas. O valor de EUR utilizado no cenário atual foi de $2,39 \text{ g MJ}^{-1}$ (KINIRY et al., 2001). Para considerar o efeito da temperatura na EUR foi utilizada uma função de resposta com quatro temperaturas cardinais descrita por Soltani et al. (2001) e representada na Figura 3. Com esta função a EUR é máxima quando a temperatura média diária do ar é ótima (entre 22 e 32°C) e é multiplicada por um fator de correção em temperaturas sub e supra ótimas, que reduz a EUR (Figura 3).

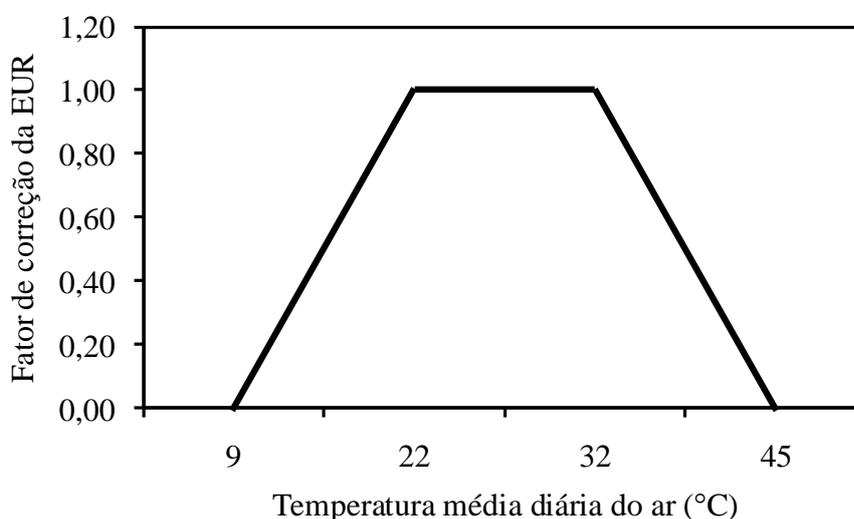


Figura 3 – Função de resposta da Eficiência do Uso da Radiação (EUR) à temperatura média diária do ar usada no modelo InfoCrop neste estudo.

O efeito do aumento da concentração de CO_2 na fotossíntese das plantas foi computado por uma relação entre EUR e a concentração de CO_2 na atmosfera. Em experimentos que utilizaram câmaras de topo aberto com ambiente enriquecido com CO_2 ,

Weerakoon et al. (2000) encontraram aumento médio de 25% na EUR de arroz com o dobro da concentração de CO₂, em diferentes estações de cultivo. Assim considerou-se um aumento de 25% na EUR, ou seja, EUR=2,99 g MJ⁻¹ nos cenários de mudança climática com o dobro da concentração de CO₂ (700 ppm).

No cálculo da produção diária de matéria seca na planta no modelo InfoCrop utiliza-se a radiação fotossinteticamente ativa (RFA) como sendo 50% da densidade de fluxo de radiação solar global, em MJ m⁻² dia⁻¹, que foi calculada no presente estudo a partir do brilho solar pela equação de Angstron, modificada por Prescott e Penman (ESTEFANEL et al. 1990). 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).

Uma vez simulada a produção de matéria seca total diária na planta, no modelo InfoCrop calcula-se a partição da matéria seca total entre raízes e parte aérea. A fração destinada à parte aérea é então distribuída entre os diferentes órgãos da planta (folhas, colmos e panículas) de acordo com o estágio em que a cultura se encontra. A partir da antese inicia o processo de senescência das folhas e do colmo, que é considerado pela perda de uma fração do peso acumulado em cada órgão da planta até o momento. A fração da matéria seca destinada a cada parte da planta e a fração de senescência são dependentes do estágio de desenvolvimento da cultura (Tabela 3).

A matéria seca alocada para as folhas, em g m⁻² dia⁻¹, multiplicada pela área foliar específica, em m² g⁻¹ (calculada em função do estágio de desenvolvimento), permite que o peso das folhas seja transformado em área, a partir da qual calcula-se o índice de área foliar (IAF), que é atualizado diariamente no cálculo da produção de matéria seca. No primeiro dia de simulação da produção de matéria seca, a área foliar inicial de uma planta é considerada 0,0001 m² (BOUMAN et al., 2004), e uma densidade de 200 plantas m⁻², que é a recomendada para a cultura do arroz no local deste estudo, resulta em um IAF inicial de 0,02. Considerou-se que uma parte dos colmos também tem atividade fotossintética, assim foi utilizada a área específica de colmos verdes de 0,003 m² g⁻¹, multiplicada pela matéria seca alocada nos colmos, sendo este valor acrescentado ao valor do IAF, resultando na área total de interceptação da radiação solar para o cálculo de produção de matéria seca.

Em uma simulação feita previamente, para testar o modelo, percebeu-se que algumas vezes o valor do IAF máximo simulado pelo modelo era bastante elevado e não representava a realidade. Então, buscou-se na bibliografia referências que indicassem o IAF máximo em boas condições de crescimento, na região de estudo, com cultivares locais. Nesta busca foi encontrado o valor de 7,5 como IAF máximo, em condições de alta adubação nitrogenada,

com a cultivar IRGA 417 em Santa Maria (CAMARGO et al., 2008a). Este valor de IAF de 7,5 foi estabelecido como o IAF máximo no modelo InfoCrop.

Tabela 3 – Fração da matéria seca alocada nas diferentes partes da planta de arroz e senescência em função do estágio de desenvolvimento da cultura usado no modelo InfoCrop. Adaptado de Bouman et al. (2004).

Estágio	Partição da Matéria Seca				
	Parte Aérea	Folhas	Colmos	Panículas	Senescência
0,0	0,5	0,6	0,4	0,0	0,0
0,43	0,75	0,6	0,4	0,0	0,0
0,5	0,75	0,6	0,4	0,0	0,0
0,75	0,75	0,3	0,7	0,0	0,0
1,0	1,0	0,0	0,4	0,6	0,015
1,2	1,0	0,0	0,0	1,0	0,015
1,6	1,0	0,0	0,0	1,0	0,025
2,1	1,0	0,0	0,0	1,0	0,05
2,5	1,0	0,0	0,0	1,0	0,05

O número de espiguetas formadas em um dia no modelo é calculado por um fator de formação de espiguetas (número de espiguetas por g de matéria seca) em função da matéria seca produzida naquele dia ($\text{g m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), resultando em espiguetas $\text{m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$. Este valor é acumulado desde a diferenciação do primórdio floral até a antese, resultando no número total de espiguetas formadas por m^{-2} . O número final de espiguetas formado sofre uma correção em função da esterilidade das espiguetas causada por temperaturas extremas, tanto muito baixas, quanto muito altas, no período crítico que fica entre os estágios 0,75 e 1,2 para as temperaturas baixas e entre os estágios de 0,96 e 1,22 para as temperaturas elevadas.

A partir da antese, parte da matéria seca produzida começa a ser translocada para a panícula, dando início ao enchimento das espiguetas, formando os grãos. A fração da matéria seca que é destinada à panícula é dividida entre o total de espiguetas que foram produzidas na planta e após o período crítico de sensibilidade às temperaturas extremas (estágio 1,2), o número total de grãos é corrigido em função da esterilidade de espiguetas, sendo que a

matéria seca que havia sido alocada nos grãos que sofreram a esterilidade é perdida. Em adição à matéria seca produzida diariamente, após a antese 10% das reservas previamente acumuladas no colmo é translocada para os grãos, todos os dias.

Quando um quarto do período de enchimento de grãos é completado, a massa seca dos grãos é avaliada no modelo. Se o peso de cada grão for menor que um quarto do peso potencial de um grão ($0,0249 \text{ g grão}^{-1}$), o número total de grãos é diminuído para ocorrer uma redistribuição da matéria seca, com o objetivo de que cada grão tenha um quarto do peso potencial. Este procedimento, apesar de reduzir o número de grãos produzidos pela cultura, não altera o rendimento final, pois é apenas uma redistribuição da matéria seca nos grãos. Esta é a maneira de controlar, no modelo, o peso individual dos grãos, um componente do rendimento da cultura do arroz que apresenta pouca variabilidade.

O modelo Infocrop foi implementado em linguagem Fortran, utilizando o compilador Force – Versão 2.0.8p. É importante ressaltar que nas simulações não foram considerados os efeitos de pragas, doenças e plantas invasoras, nem manejo de adubação, portanto o rendimento simulado representa o potencial produtivo em cada cenário, considerando apenas o efeito da temperatura do ar e da concentração de CO_2 , sem a interferência de outros fatores.

3.2 Cenários de mudança climática

Este estudo numérico foi realizado nas condições de Santa Maria, RS (latitude: $29^{\circ}43'S$, longitude: $53^{\circ}43'W$ e altitude: 95m). O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é Cfa Subtropical úmido, sem estação seca definida, com verões quentes. Santa Maria está localizada na região Central do estado, uma das regiões de maior produção de arroz irrigado do Rio Grande do Sul.

Os cenários de mudança climática utilizados neste estudo são os mesmos utilizados por Lago et al. (2008). Foi considerado um aumento na concentração do CO_2 atmosférico em cenários de mudança climática, assumindo-se os valores de 350 ppm, no cenário atual (sem mudança climática) e 700 ppm, nos cenários de mudança climática (IPCC, 2007). Os cenários foram gerados com o Weather Generator LARS-WG (SEMENOV et al., 1998), tendo-se como base a série de dados meteorológicos observados de 1969 a 2003, coletados na Estação Meteorológica Convencional do 8º Distrito de Meteorologia/Instituto Nacional de Meteorologia, localizada no Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Santa

Maria, Santa Maria, RS. A partir deste conjunto de dados foram gerados os cenários sintéticos sem aumento (cenário atual) e com aumento de +1°C, +2°C, +3°C, +4°C e +5°C na temperatura média do ar por um período de 100 anos (Lago et al., 2008), totalizando sete cenários: Atual (sem mudança na concentração de CO₂ e na temperatura); 2xCO₂ (dobro da concentração de CO₂, sem mudança na temperatura); +1°C (dobro da concentração de CO₂ e aumento de 1°C na temperatura do ar); +2°C (dobro da concentração de CO₂ e aumento de 2°C na temperatura do ar); +3°C (dobro da concentração de CO₂ e aumento de 3°C na temperatura do ar); +4°C (dobro da concentração de CO₂ e aumento de 4°C na temperatura do ar); +5°C (dobro da concentração de CO₂ e aumento de 5°C na temperatura do ar). As mudanças na concentração de CO₂ e na temperatura foram consideradas já a partir do primeiro ano, e esse aumento foi mantido constante nos anos seguintes, considerando cada um dos 100 anos como uma repetição. O LARS-WG é um modelo estocástico que tem sido usado em estudos do impacto de cenários de mudança climática sobre o desempenho de agroecossistemas (WEISS et al., 2003; RICHTER; SEMENOV, 2005; STRECK; ALBERTO, 2006). Este modelo estocástico pode gerar séries de dados meteorológicos através de distribuições de probabilidade semi-empíricas que mantêm as estatísticas da série original (SEMENOV et al., 1998). Para Santa Maria, RS, a comparação entre séries climáticas em cenários de mudança climática com a série de dados meteorológicos observados de 1969 a 2003 foi realizada por Streck e Alberto (2006) e mostrou que não há diferença entre as estatísticas das duas séries, indicando que as séries climáticas geradas pelo LARS-WG podem ser usadas neste estudo.

3.3 Avaliação do modelo

Para avaliação do modelo InfoCrop com as alterações em alguns dos coeficientes, conforme mencionado, o rendimento de grãos de arroz foi simulado utilizando dados meteorológicos (temperatura mínima e máxima diária do ar e brilho solar) da Estação Meteorológica Convencional, pertencente ao 8º Distrito de Meteorologia/Instituto Nacional de Meteorologia e localizada no Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

O modelo foi avaliado comparando-se dados de safra catalogados pelo Instituto Riograndense do Arroz (IRGA, 2009) no período de 1996/97 até 2008/09, com simulações

em três datas de semeadura (20/09, 20/10 e 20/11) que são representativas do início, meio e final do período de semeadura recomendado para a região (SOSBAI, 2007), e utilizando as três cultivares de ciclos bastante distintos: IRGA 421 (ciclo muito precoce), IRGA 417 (ciclo precoce) e EPAGRI 109 (ciclo longo). Os dados de rendimento disponibilizados pelo IRGA são relativos à média do município de Santa Maria, sem distinção de cultivares ou datas de semeadura, enquanto que o rendimento simulado foi estimado a partir de dados meteorológicos de um local específico, o que pode ser uma fonte de erro na avaliação do modelo. Com o objetivo de diminuir esta fonte de erro foi utilizado o rendimento médio das simulações de todas as cultivares e datas de semeadura na comparação com os dados do IRGA, já que os valores observados também são uma média de diferentes cultivares (com ciclos distintos) em diversas datas de semeadura.

Outra avaliação do modelo InfoCrop foi realizada comparando-se o rendimento simulado com resultados de experimentos realizados na área de várzea da UFSM, com as cultivares e datas de semeaduras utilizadas nestes experimentos (Tabela 4), pois, como o rendimento é simulado com dados meteorológicos de uma Estação Meteorológica local, a avaliação do modelo nestas condições é bastante apropriada. Além disso, em experimentos há um controle maior de fatores adversos, como pragas, doenças e plantas invasoras, e em geral as práticas de manejo são realizadas segundo as recomendações para a cultura, com o objetivo de isolar o efeito dos tratamentos que estavam sendo avaliados. Estes cuidados resultam em rendimentos mais próximos do potencial produtivo da cultura, situação que é simulada pela versão do modelo InfoCrop usada neste estudo. Em áreas de produção comercial muitos destes fatores são difíceis de serem controlados, pela grande área que estes cultivos abrangem, e pela forma de controle de pragas, doenças e plantas invasoras que permite um determinado nível de dano na cultura, para que o controle seja viável economicamente.

Para a avaliação do modelo com dados de experimentos realizados na UFSM foram selecionados os trabalhos em que era indicada a data da semeadura, a cultivar e o rendimento de grãos, pois o modelo InfoCrop necessita destes dados de entrada. No modelo é utilizada a soma térmica das fases do ciclo de desenvolvimento das cultivares, calculada conforme metodologia descrita por Lago (2008), por isso só foram selecionados para a avaliação do modelo os trabalhos que usavam as mesmas cultivares citadas por Lago (2008). A cultivar IRGA 422 CL não faz parte do estudo de Lago (2008), mas esta cultivar foi utilizada neste estudo pois foi obtida pelo programa de melhoramento genético do IRGA, sendo essencialmente derivada da cultivar IRGA 417 (IRGA, 2009), que faz parte das cultivares

avaliadas por Lago (2008), e o crescimento e desenvolvimento destas duas cultivares é muito semelhante.

Tabela 4 – Dados de experimentos com arroz irrigado realizados na UFSM e utilizados na avaliação do modelo InfoCrop.

Ano agrícola	Data de Semeadura	Cultivar	Rendimento (Kg ha⁻¹)	Referência
1998/99	01/11/1998	BRS TAIM	7595,0	Weber et al. (2003)
1998/99	01/11/1998	IRGA 417	8447,0	Weber et al. (2003)
2002/03	30/11/2002	BRS TAIM	4818,0	Marchesan et al. (2007)
2003/04	18/10/2003	BRS TAIM	10154,0	Marchesan et al. (2007)
2004/05	23/10/2004	IRGA 420	6971,0	Marchesan et al. (2007)
2004/05	28/10/2004	IRGA 422 CL	8411,0	Santos et al. (2007)
2004/05	29/10/2004	IRGA 422 CL	8346,0	Villa et al. (2006)
2005/06	03/11/2005	IRGA 417	9783,0	Camargo et al. (2008a)
2005/06	03/11/2005	IRGA 417	10025,0	Camargo et al. (2008b)

Para avaliar o desempenho do modelo foi calculada a estatística raiz do quadrado médio do erro (RQME) e foi aplicado o Teste t ao nível de 5% de probabilidade. A RQME (JANSSEN; HEUBERGER, 1995) foi calculada por:

$$RQME = [\sum (P_i - O_i)^2 / N]^{0.5}$$

Em que P_i é o valor simulado, O_i é o valor observado, e N é o número de observações.

3.4 Simulação do rendimento em cenários de mudança climática

Uma vez avaliado o modelo InfoCrop com dados independentes, o rendimento de grãos de arroz foi estimado nos diferentes cenários rodando-se o modelo em cada um dos 100 anos de cada cenário, conforme metodologia usada anteriormente (STRECK; ALBERTO, 2006; LAGO et al., 2008).

Na simulação foram consideradas três cultivares de arroz irrigado do tipo moderno, diferentes em relação à duração do ciclo de desenvolvimento: IRGA 421 – cultivar muito precoce, utilizada no manejo de áreas infestadas com arroz vermelho (principal planta invasora da cultura), em função de seu ciclo de desenvolvimento bastante curto, semeadura recomendada em Santa Maria a partir de 11 de outubro até 10 de dezembro; IRGA 417 – cultivar de ciclo precoce, muito cultivada na maioria das áreas de arroz irrigado no estado do Rio Grande do Sul, por sua alta produtividade, ótima qualidade dos grãos, alto vigor inicial das plântulas e boa adaptabilidade a todas as regiões orizícolas do RS, recomenda-se a semeadura no período entre 11 de outubro e 30 de novembro em Santa Maria; EPAGRI 109 – cultivar de ciclo longo e alto rendimento de grãos, o período para a semeadura em Santa Maria é entre 01 e 30 de outubro (SOSBAI, 2007). O modelo foi rodado para cada uma das cultivares em sete datas de semeadura: 20 de julho, 20 de agosto, 20 de setembro, 20 de outubro, 20 de novembro, 20 de dezembro e 20 de janeiro. Estas datas de semeadura foram selecionadas por compreenderem um período amplo, variando desde semeaduras fora da época recomendada para a região (antes – 20 de julho, 20 de agosto e 20 de setembro; e depois do período recomendado – 20 de dezembro e 20 de janeiro) até semeaduras dentro do período recomendado atualmente para a semeadura (20 de outubro e 20 de novembro).

O rendimento de grãos das três cultivares de arroz irrigado, nas sete datas de semeadura, foi simulado em sete cenários sintéticos com 100 anos de dados de temperatura do ar e radiação solar (LAGO et al., 2008). O cenário ‘Atual’ corresponde a uma projeção de 100 anos com temperatura do ar e radiação solar gerados com o Weather Generator LARS-WG (SEMENOV et al., 1998) sem mudança climática, considerando a atual concentração de CO₂. Neste cenário, a série com dados diários de temperatura mínima e máxima do ar e radiação solar não tem tendência, ou seja, é uma série estável (STRECK; ALBERTO, 2006). O cenário ‘2xCO₂’ corresponde à projeção de aumento da concentração de CO₂ (dobro) até o final deste século, sem alteração na temperatura do ar, ou seja, tem os mesmos dados de temperatura do cenário ‘Atual’ e considera 700 ppm de CO₂. Os cenários ‘+1°C’, ‘+2°C’, ‘+3°C’, ‘+4°C’ e ‘+5°C’ representam, respectivamente, os aumentos de 1, 2, 3, 4 e 5°C na temperatura média do ar e a concentração de 700 ppm de CO₂. O aumento na temperatura média foi obtido pelo aumento simétrico nas temperaturas mínima e máxima diária do ar. Considerou-se que a radiação solar não é alterada, sendo igual em todos os cenários.

A análise dos dados foi realizada através do cálculo da mudança média percentual do rendimento simulado nos cenários de mudança climática em relação ao cenário ‘Atual’ (sem mudança), para cada cultivar e data de semeadura. Considerou-se como valor de referência

para este cálculo a média simulada no cenário sem mudança climática, nos meses recomendados atualmente para a semeadura do arroz irrigado na Depressão Central do RS, que são outubro-novembro para as cultivares IRGA 421 e IRGA 417 e setembro-outubro para a cultivar EPAGRI 109. A época preferencial para a semeadura foi definida a partir das recomendações técnicas para a cultura do arroz irrigado no Sul do Brasil (SOSBAI, 2007) e com o auxílio de resultados de um ensaio bioclimático para o RS (MARIOT et al., 2009).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Avaliação do modelo

A simulação do rendimento de grãos para as safras de 1996/97 até 2008/09 e os rendimentos observados nestes anos estão na Figura 4, sendo cada ponto a média do rendimento simulado para as cultivares e datas de semeadura em cada safra, e a linha representa o rendimento médio do município de Santa Maria, RS, no mesmo período (IRGA, 2009). Pode-se observar que a simulação com o modelo InfoCrop conseguiu capturar a variação interanual do rendimento de grãos de arroz observadas no município de Santa Maria no período e houve tendência de superestimativa do rendimento médio de grãos com um erro médio (RQME) de $0,795 \text{ Mg ha}^{-1}$. Este valor de erro médio corresponde a 13,7% da média do rendimento observado em todo o período ($5,819 \text{ Mg ha}^{-1}$). Na avaliação do modelo InfoCrop na Índia, por Aggarwal et al. (2006b), os autores encontraram um erro correspondente a 8,3% do rendimento observado. Este maior erro encontrado para Santa Maria pode ser em função da diferença entre os locais em que o modelo foi avaliado e diferenças entre as cultivares utilizadas nestas avaliações. Alguns ajustes foram realizados no modelo para melhorar as simulações, mas muitos coeficientes originais foram mantidos no modelo, pois não se dispõe destas informações para cultivares brasileiras.

Uma fonte adicional de erro nas estimativas da Figura 4 é o fato da versão do modelo InfoCrop usada neste estudo simular o rendimento potencial, enquanto que os dados observados são médias de lavouras de todo o município de Santa Maria, que usam diferentes manejos da adubação nitrogenada e diferentes tecnologias no controle de pragas, doenças e plantas invasoras, fatores que são difíceis de eliminar no campo, e na maioria das vezes, inclusive, são tolerados até certo nível de dano, para que o controle seja viável economicamente. Nesta versão do modelo InfoCrop também não são considerados efeitos abióticos como: ventos fortes, que afetam a esterilidade de espiguetas (MATSUI et al., 1997b; SOSBAI, 2007) e provocam acamamento das plantas; a umidade relativa e o déficit de saturação do ar que afetam a fotossíntese da planta (TAIZ; ZEIGER, 2004); manejo da adubação, principalmente da adubação nitrogenada, que tem bastante influência no

rendimento de grãos de arroz irrigado (FREITAS et al., 2001), entre outros fatores que tem efeito direto ou indireto no rendimento de grãos da cultura do arroz. Além disso, a média simulada é o resultado da simulação de três cultivares em três datas de semeadura, para um local específico, utilizando dados meteorológicos de uma única estação, enquanto o valor observado é referente à média de todo município de Santa Maria, o que compreende um grupo de cultivares e datas de semeadura muito maior e não especificadas.

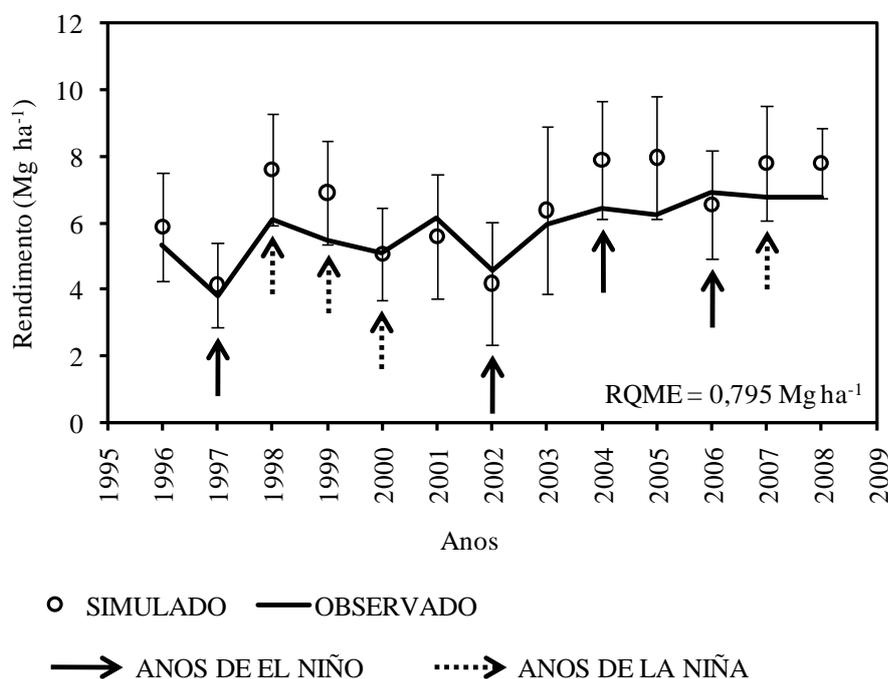


Figura 4 – Rendimento de grãos de arroz irrigado simulado com o modelo InfoCrop e divulgado pelo Instituto Riograndense do Arroz nas safras de 1996/97 (1996) a 2008/09 (2008) no município de Santa Maria, RS. Os valores simulados referem-se à média de três cultivares (IRGA 421, IRGA 417 e EPAGRI 109) em três datas de semeadura (20/09, 20/10 e 20/11) a barra representa o Erro Padrão desta média. O RQME é a raiz do quadrado médio do erro, que representa o erro médio da simulação.

A avaliação do modelo com dados experimentais está representada na Figura 5. Observa-se que o rendimento simulado capturou a tendência de variação do rendimento observado nos diferentes experimentos, novamente com tendência de superestimativa e erro médio de 0,791 Mg ha⁻¹.

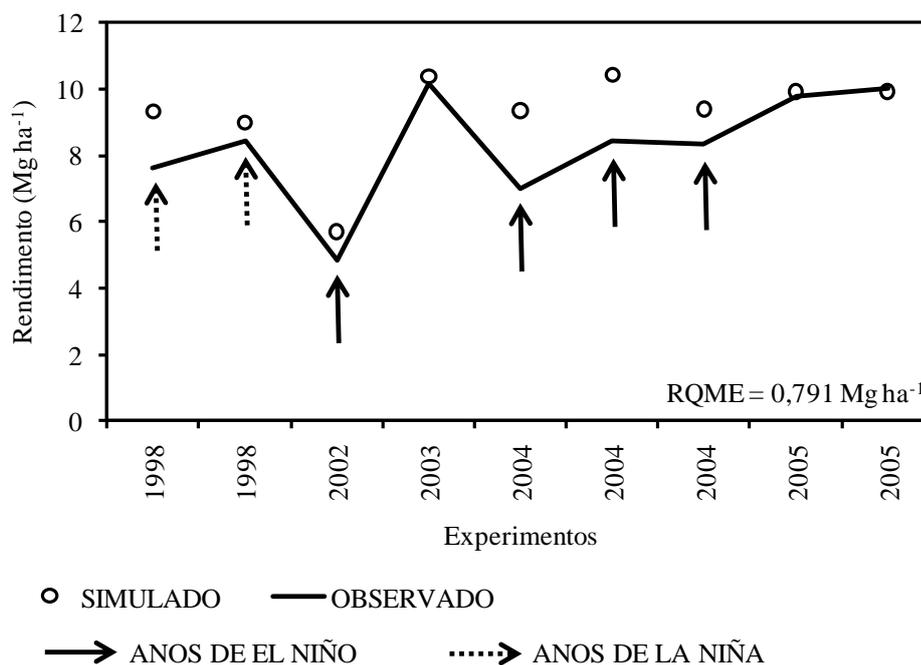


Figura 5 – Rendimento de grãos de arroz irrigado simulado com o modelo InfoCrop e observado em experimentos realizados na Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, entre os anos de 1998 (safra 1998/99) e 2005 (safra 2005/06). O RQME é a raiz do quadrado médio do erro e representa o erro médio da simulação. A descrição dos experimentos está na tabela 4.

Nas Figuras 4 e 5, estão indicados por setas os anos em que ocorreram eventos de El Niño e La Niña (PAULA, 2009). Na região Sul do Brasil os anos de El Niño são caracterizados por precipitação e umidade relativa do ar acima da normal, enquanto nos anos de La Niña a precipitação e a umidade relativa do ar geralmente são abaixo da normal e são marcados por grandes secas na região (FONTANA; BERLATO, 1997; STRECK et al., 2008b). Estas anomalias levam a menores rendimentos de arroz irrigado em anos de El Niño e maiores rendimentos em anos de La Niña no RS, comparados à anos Neutros (BERLATO; FONTANA, 2003). Pode ser observado nas Figuras 4 e 5 que nos anos de El Niño os valores simulados ficam bem próximos do observado, com exceção do ano de 2004 (safra 2004/05), que foi um ano em que o evento de El Niño foi de intensidade fraca (PAULA, 2009) e se descaracterizou a partir de dezembro de 2004, quando teve início um período de estiagem no Rio Grande do Sul que prolongou-se até o mês de março de 2005. Nos anos de La Niña os valores simulados se afastam mais dos valores observados, com exceção do ano 2000 (safra 2000/01) quando o evento foi classificado como La Niña de intensidade fraca (PAULA,

2009). Assim, o modelo superestimou o rendimento de grãos de arroz irrigado em anos em que houve alta disponibilidade de radiação solar e poucos dias chuvosos. Uma possível explicação para isto é a simplificação assumida no modelo no que diz respeito à fotossíntese, pois ele utiliza um valor pré-determinado de EUR (eficiência do uso da radiação) no cálculo da produção de matéria seca. Esta metodologia tem sido utilizada em modelos de simulação com resultados satisfatórios (AGGARWAL et al., 2006a,b) e com a vantagem de requerer dados de entrada mais simples para o cálculo. No entanto com esta simplificação não são considerados alguns fatores importantes como a abertura estomática, que tem grande influência na fotossíntese das plantas (TAIZ; ZEIGER, 2004). Outra hipótese a ser levantada para explicar a superestimativa do modelo em anos com elevada disponibilidade de radiação solar é a possibilidade de o manejo do nitrogênio ser um fator limitante para a produção potencial nas lavouras do estado, tendo em vista que a versão do modelo InfoCrop utilizada nesta simulação assume não haver limitação da cultura por nitrogênio, o que geralmente não se observa nas lavouras comerciais.

Na Figura 6 está o rendimento simulado e observado em diferentes experimentos realizados na UFSM e no município de Santa Maria. Observa-se uma maior frequência de dados com superestimativa do modelo InfoCrop e um erro médio de $0,85 \text{ Mg ha}^{-1}$.

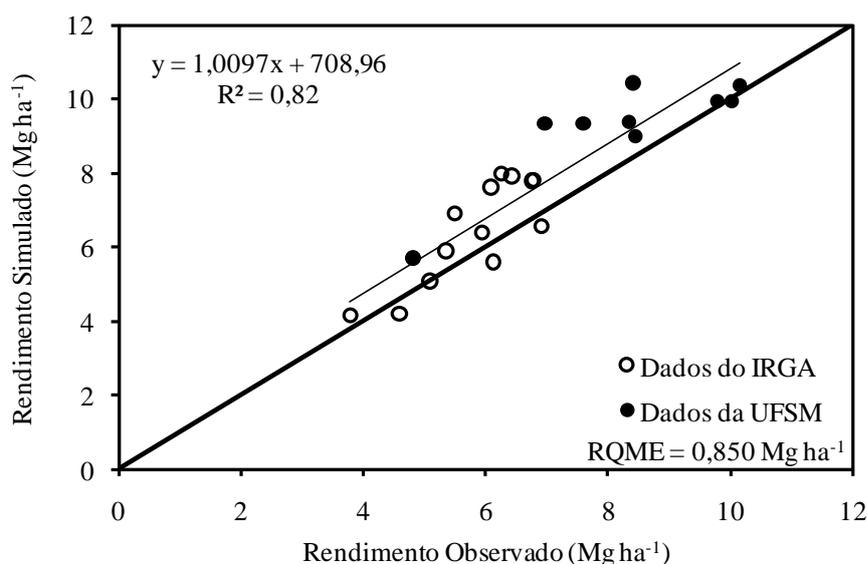


Figura 6 – Rendimento simulado pelo modelo InfoCrop versus rendimento observado em diferentes experimentos realizados na Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS e observado no município de Santa Maria catalogados pelo Instituto Riograndense do Arroz. A linha transversal é a linha 1:1.

Os rendimentos de grãos de arroz irrigado simulados e observados, apresentados na Figura 6 não diferiram pelo Teste t ao nível de 5% de probabilidade (ANEXO B), indicando que o modelo de simulação do rendimento de grãos de arroz irrigado simula satisfatoriamente a tendência dos rendimentos da cultura e, portanto, pode ser usado para a finalidade do presente estudo.

4.2 Rendimento de grãos de arroz irrigado em cenários de mudança climática

O rendimento de grãos simulado para os cenários climáticos, cultivares e datas de semeadura estão nas Figuras 7, 8 e 9, sendo cada barra correspondente ao rendimento médio de grãos nos 100 anos de simulação. Comparando-se os rendimentos das três cultivares, os menores rendimentos são da cultivar de ciclo muito precoce IRGA 421 (Figura 7a), intermediários na cultivar de ciclo precoce IRGA 417 (Figura 8a) e maiores na cultivar de ciclo longo EPAGRI 109 (Figura 9a). Estes resultados concordam com os resultados de ensaios experimentais do IRGA (MARIOT et al., 2009) e podem ser atribuídos à diferença de ciclo, de modo que quanto maior o ciclo de desenvolvimento, maior o potencial produtivo da cultivar. No cenário atual, os maiores rendimentos de grãos foram simulados nas semeaduras de 20 de outubro e 20 de novembro para a cultivar muito precoce, de 20 de setembro e 20 de outubro para a cultivar precoce e 20 de agosto e 20 de setembro para a cultivar de ciclo longo, o que também concorda com os resultados experimentais do IRGA (MARIOT et al., 2009), ou seja, os maiores rendimentos de arroz são alcançados com semeaduras antecipadas e cultivares de ciclo longo. Estes resultados indicam que a versão do modelo InfoCrop captura as diferenças de rendimento das cultivares atualmente usadas no RS, em diferentes datas de semeadura, o que é mais um aspecto a favor de que o modelo pode ser usado nos cenários climáticos.

A simulação do rendimento de grãos de arroz irrigado com o modelo InfoCrop mostrou que há uma tendência de aumento do rendimento de grãos em todos os cenários de mudança climática considerados neste estudo, para Santa Maria, RS, em relação ao cenário atual, para as três cultivares. Krishnan et al. (2007) simularam o rendimento de grãos de arroz em cenários de mudança climática, com aumentos na temperatura do ar de até 5°C, para

diferentes locais da Índia, e os resultados indicaram que o rendimento de grãos de arroz diminuiu em relação ao cenário atual para locais tropicais de latitudes entre 20 e 23°N, enquanto o rendimento de grãos nos cenários de mudança climática aumentou em um local extratropical com latitude de 26°8'N. Resultados similares já haviam sido relatados anteriormente por Soltani et al. (2001), sugerindo que o rendimento de grãos de arroz em cenários de mudança climática deverá diminuir em locais de baixa latitude (tropicais) e poderá aumentar em locais de média e alta latitudes (subtropicais e temperados). Como Santa Maria está localizada em uma latitude média (subtropical), os resultados concordam com os encontrados em outros locais, indicando possíveis benefícios para o rendimento potencial de arroz nestes locais. O aumento do rendimento nos cenários com o dobro de CO₂ pode ser explicado, em parte, pelo aumento do número de espiguetas por m² (Figura 7b, 8b e 9b), pois no cenário 'Atual' este componente do rendimento é limitado pela taxa fotossintética, já que a atual concentração de CO₂ na atmosfera não é suficiente para saturar a enzima Rubisco nas plantas com metabolismo C₃. Em uma atmosfera enriquecida de CO₂, aumenta a fotossíntese e, conseqüentemente, a biomassa produzida pela cultura (fonte) e aumenta o número de espiguetas produzidas por m² (dreno), o que poderá aumentar a alocação de fotoassimilados para o enchimento de grãos. Como a massa individual de grãos é limitada pelo tamanho potencial de cada grão, mais espiguetas podem ser enchidas, se não houver limitação de fonte nem de dreno, aumentando assim o número final de grãos por m².

O efeito dos cenários climáticos, em relação ao cenário 'Atual', foi diferente nas três cultivares. Os maiores incrementos relativos no rendimento de grãos foram observados na cultivar muito precoce IRGA 421, que apresentou aumentos de até 100% no cenário '2xCO₂', em relação ao cenário 'Atual', com pequenas variações deste aumento nas diferentes datas de semeadura. Para esta cultivar o incremento no rendimento de grãos em relação ao cenário 'Atual' diminuiu com o aumento da temperatura do ar nos cenários de mudança climática, até atingir o menor incremento no cenário que considera um aumento de 5°C na temperatura média diária do ar (Figura 7a), com exceção das semeaduras de Dezembro e Janeiro, onde ocorreu pouca variação de rendimento entre os diferentes cenários de mudança climática.

A cultivar precoce IRGA 417 apresentou incrementos de aproximadamente 60% no rendimento de grãos no cenário '2xCO₂', em relação ao cenário 'Atual' (Figura 8a). Nas semeaduras de Julho, Agosto e Setembro o incremento no rendimento de grãos diminuiu com o aumento na temperatura média do ar nos cenários de mudança climática, enquanto nas demais datas de semeadura o maior incremento no rendimento de grãos em relação ao cenário 'Atual' ocorreu naqueles que contemplaram algum aumento de temperatura do ar. O

rendimento de grãos continuou aumentando, mesmo quando a temperatura média do ar aumentou 1°C na semeadura de Outubro, e diminuiu com aumentos maiores na temperatura. Na semeadura de Novembro os incrementos de rendimento nos cenários de mudança climática foram semelhantes até o cenário '+4°C', apresentando uma pequena redução do incremento quando a temperatura do ar aumentou em 5°C acima do cenário 'Atual'. Na semeadura de Dezembro observa-se pouca diferença de rendimento entre os cenários de mudança climática e em Janeiro o incremento no rendimento de grãos foi maior nos cenários que consideram aumentos na temperatura do ar.

O rendimento de grãos da cultivar de ciclo longo EPAGRI 109 teve o menor incremento relativo entre as cultivares nos cenários de mudança climática, permanecendo em torno de 30% de incremento para o cenário '2xCO₂' nas diferentes datas de semeadura. Na Figura 9a pode-se observar que para as semeaduras de Agosto, Setembro, Outubro, Novembro e Dezembro houve pouca diferença de incremento do rendimento de grãos entre os cenários de mudança climática. Na semeadura de Julho o maior incremento foi no cenário '+1°C', diminuindo gradativamente até o cenário '+5°C'. Na semeadura de Janeiro destaca-se o baixo rendimento de grãos no cenário 'Atual', que aumenta consideravelmente nos cenários de mudança climática, demonstrando efeitos benéficos tanto pelo aumento da concentração de CO₂, quanto pelo aumento da temperatura média do ar nesta situação (cultivar de ciclo longo em semeadura tardia).

O principal incremento no rendimento de grãos das três cultivares ocorre pelo efeito do aumento da concentração de CO₂, que é substrato básico para fotossíntese, aumentando a produção de biomassa na planta (KIMBALL et al., 1993). Nas plantas C₃, como é o caso do arroz, a atual concentração de CO₂ atmosférico é limitante para a fotossíntese, e a taxa fotossintética destas plantas aumenta cerca de 66% se a concentração atual de CO₂ for duplicada, respondendo positivamente aos incrementos até aproximadamente 1000 ppm de CO₂ (TAIZ; ZEIGER, 2004). Este aumento na taxa fotossintética não significa um aumento equivalente no rendimento de grãos, pois parte da energia será utilizada no metabolismo da planta e no crescimento das demais partes da planta, como colmos e folhas. A maioria dos trabalhos indica um aumento de aproximadamente 30% no rendimento de espécies C₃, inclusive para o arroz, em função do dobro da concentração de CO₂ (KIMBALL et al., 1993; SOLTANI et al., 2001; STRECK, 2005). No entanto, em alguns estudos foram encontrados aumentos maiores no rendimento de grãos de arroz, como um incremento de mais de 56% relatado por Krishnan et al. (2007), em um estudo de simulação com o modelo InfoCrop no leste da Índia, usando uma cultivar de ciclo precoce.

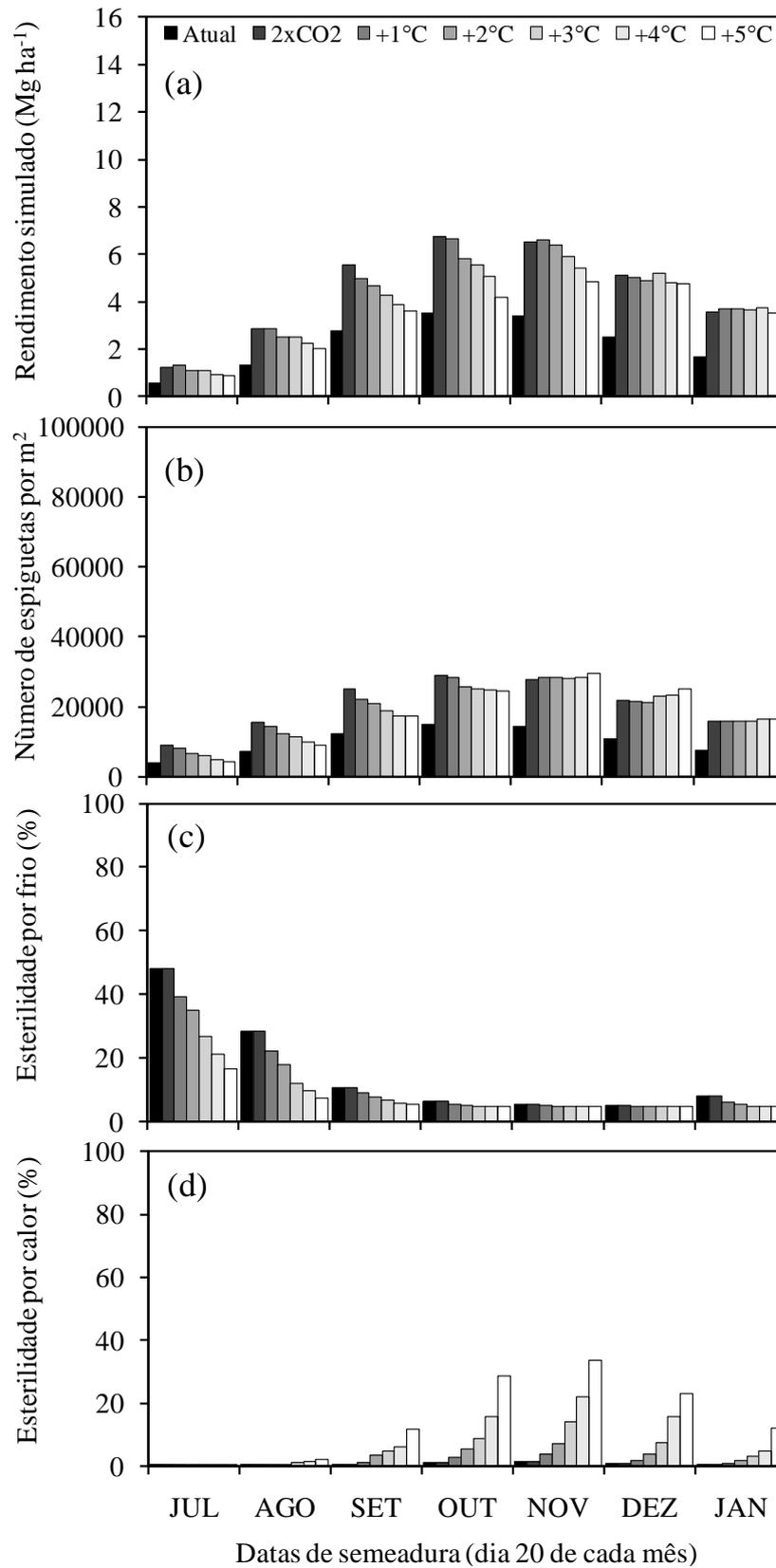


Figura 7 – Rendimento de grãos (a), número de espiguetas (b) e porcentagem de esterilidade de espiguetas causada por frio (c) e por calor (d), simulados pelo modelo InfoCrop, para a cultivar IRGA 421 em sete datas de semeadura com intervalos mensais, de 20 de julho (JUL) a 20 de janeiro (JAN), e diferentes cenários climáticos, indicados no interior do painel (a). Santa Maria, RS.

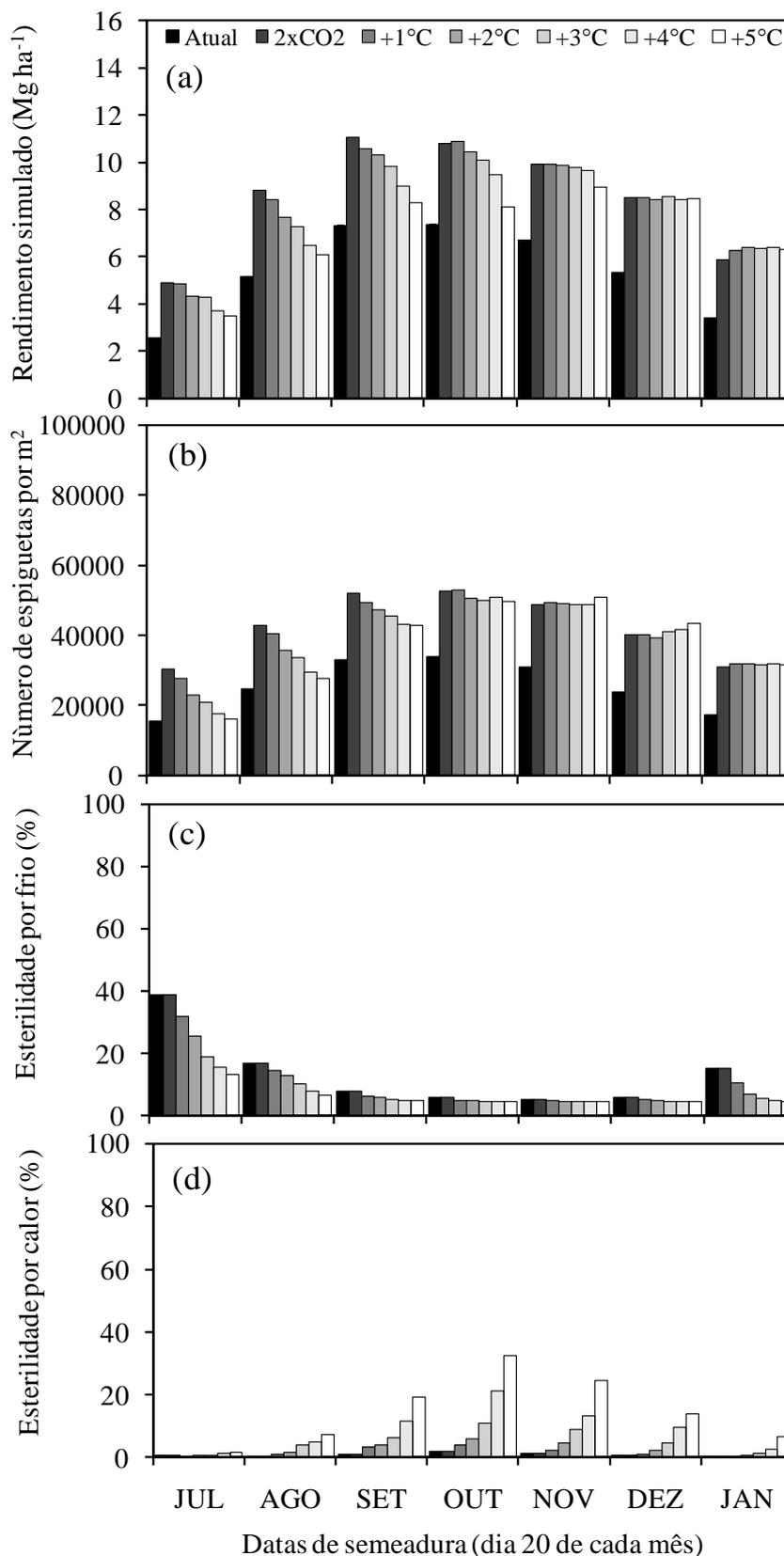


Figura 8 – Rendimento de grãos (a), número de espiguetas (b) e porcentagem de esterilidade de espiguetas causada por frio (c) e por calor (d), simulados pelo modelo InfoCrop, para a cultivar IRGA 417 em sete datas de semeadura com intervalos mensais, de 20 de julho (JUL) a 20 de janeiro (JAN), e diferentes cenários climáticos, indicados no interior do painel (a). Santa Maria, RS.

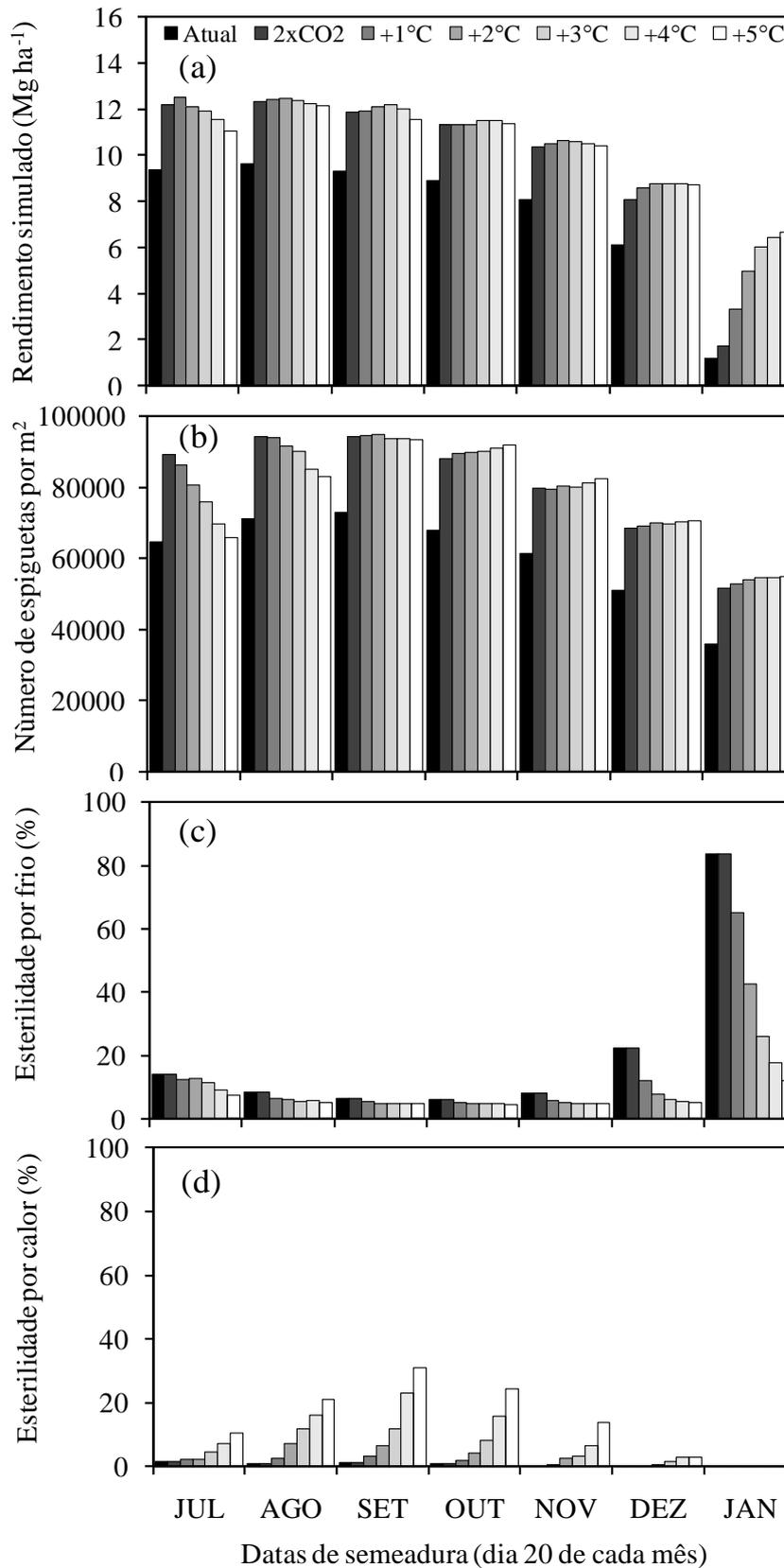


Figura 9 – Rendimento de grãos (a), número de espiguetas (b) e porcentagem de esterilidade de espiguetas causada por frio (c) e por calor (d), simulados pelo modelo InfoCrop para a cultivar EPAGRI 109 em sete datas de semeadura com intervalos mensais, de 20 de julho (JUL) a 20 de janeiro (JAN), e diferentes cenários climáticos, indicados no interior do painel (a). Santa Maria, RS.

No presente estudo foi considerado um aumento de 25% na EUR devido à maior concentração de CO₂ (WEERAKOON et al., 2000), que resultou em aumentos de 30% (EPAGRI 109) até 100% (IRGA 421) no rendimento de grãos de arroz irrigado. Este aumento significativo no rendimento de grãos, em função de apenas 25% de aumento na EUR pode ser explicado no modelo InfoCrop pela translocação dos fotoassimilados dos colmos que é considerada a partir da antese. A biomassa acumulada nos colmos durante a fase vegetativa da cultura diminui após a antese, devido à remobilização dos compostos solúveis dos órgãos de reserva para os grãos, com uma redução de 9 a 15 g planta⁻¹ da antese até a maturidade fisiológica (MACHADO et al., 1990). Cock e Yoshida (1972) citaram uma contribuição dos carboidratos de órgãos de reserva para os grãos de 24-27%, e que a contribuição máxima dos colmos, bainhas e folhas pode chegar a 50% do peso final dos grãos. Segundo Aggarwal et al. (2006a), no modelo InfoCrop, a partir da antese, diariamente 10% dos fotoassimilados previamente acumulados no colmo são translocados para a panícula. A contribuição dos órgãos de reserva no enchimento de grãos de arroz irrigado ajuda a entender como é possível um aumento de 25% na EUR proporcionar um aumento maior no rendimento de grãos.

Grande parte da variação do rendimento de grãos nos diferentes cenários climáticos e nas datas de semeadura para uma mesma cultivar pode ser explicada com os dados do número total de espiguetas produzidas por m² e pela esterilidade de espiguetas causada pelas temperaturas extremas. Na Figura 7 nota-se que os maiores rendimentos de grãos alcançados pela cultivar IRGA 421 são de aproximadamente 6,7 Mg ha⁻¹ no cenário '2xCO₂' e '+1°C' com semeadura no mês de outubro. Este alto rendimento foi alcançado por uma combinação de fatores. A produção de matéria seca na semeadura no mês de outubro foi elevada em função da coincidência do período de maior necessidade da cultura com o período de maior disponibilidade de radiação solar. A fase reprodutiva (estágios 0,65 até 1) é o período em que a planta de arroz necessita de alta disponibilidade de radiação solar (STEINMETZ, 2004), e com a semeadura da cultivar IRGA 421 nos meses de outubro e novembro este período de maior necessidade de energia radiante acontece nos meses de dezembro e janeiro, quando a disponibilidade de radiação solar em Santa Maria é máxima (Figura 10). Esta condição favorável para a cultura do arroz irrigado permite a produção de um elevado número de espiguetas (Figura 7b), pois este componente do rendimento é definido neste período. As semeaduras realizadas muito cedo (julho, agosto e setembro) não permitem que a fase reprodutiva coincida com a maior disponibilidade de radiação solar, fazendo com que o número de espiguetas por m² seja menor, ocasionando, conseqüentemente, um menor rendimento de grãos. Além disso, a alta esterilidade de espiguetas causada pelo frio,

principalmente nas semeaduras de julho e agosto (Figura 7c), contribui para o menor rendimento de grãos nestes meses.

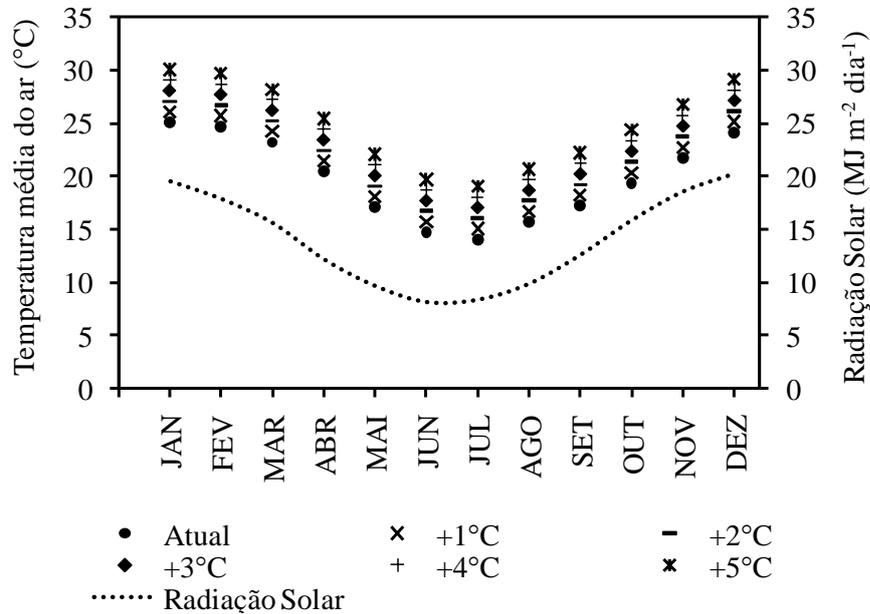


Figura 10 – Disponibilidade mensal de temperatura média e densidade de fluxo de radiação solar global diária nos cenários climáticos utilizados neste estudo. A radiação solar é a mesma em todos os cenários. Os valores de temperatura do ar e radiação solar correspondem à média mensal nos 100 anos de cada cenário.

Nos cenários de mudança climática observou-se redução da esterilidade de espiguetas pelo frio, em consequência do aumento na temperatura do ar. Para as semeaduras de setembro à janeiro a esterilidade de espiguetas por frio foi mínima, mas ocorreu um aumento da esterilidade de espiguetas por altas temperaturas (Figura 7d) nos cenários de mudança climática com aumento na temperatura do ar, principalmente na semeadura de novembro, e quanto maior o incremento na temperatura do ar, maior foi a porcentagem de espiguetas estéreis. O número de espiguetas formadas nas semeaduras dos meses de outubro e novembro é bastante semelhante entre os diferentes cenários de mudança climática (Figura 7b), indicando que o número de espiguetas não seria afetado pelo aquecimento, porém, o rendimento de grãos diminuiu com o aumento da temperatura do ar (Figura 7a), em função da esterilidade de espiguetas causada pelo calor, como pode ser observado claramente na Figura 7d, indicando um efeito negativo direto da esterilidade de espiguetas no rendimento de grãos.

Na Figura 8 são apresentados o rendimento de grãos, número de espiguetas e esterilidade da cultivar IRGA 417, nas diferentes datas de semeadura e cenários climáticos. Os maiores rendimentos de grãos observados foram próximos de 11 Mg ha^{-1} , nas semeaduras de setembro e outubro, para os cenários '2xCO₂' e '+1°C'. O número de espiguetas produzidas teve maior variação entre os cenários climáticos nas semeaduras de julho, agosto e setembro, sendo menor, quanto maior foi o incremento na temperatura do ar (Figura 8b). Nas semeaduras realizadas muito cedo (julho e agosto), a fase reprodutiva aconteceu quando a disponibilidade de radiação solar ainda estava baixa, fazendo com que a cultura partisse de um baixo potencial produtivo pelo reduzido número de espiguetas produzidas, pois no momento do ciclo que este componente do rendimento está sendo definido (fase reprodutiva) é quando a cultura do arroz necessita de alta radiação solar. Para semeaduras da cultivar IRGA 417 a partir do mês de outubro, o cenário de mudança climática não teve tanta influência no número de espiguetas produzidas e somente foi observado o efeito da maior concentração de CO₂ (Figura 8b).

A esterilidade de espiguetas causada por temperaturas muito baixas na cultivar IRGA 417 foi maior na semeadura de julho (Figura 8c), pois nesta condição a fase reprodutiva ocorre quando a temperatura do ar ainda está muito baixa (Figura 10). À medida que a temperatura do ar aumentou, nos cenários de mudança climática, a esterilidade de espiguetas por frio foi diminuindo, mas mesmo com aumento de 5°C pôde ser observada. Na semeadura de agosto a esterilidade de espiguetas pelo frio apresentou a mesma tendência do mês anterior, porém com menor intensidade. Nas semeaduras de setembro a dezembro a esterilidade pelo frio foi mínima, voltando a aumentar na semeadura de janeiro. As temperaturas muito elevadas causaram esterilidade de espiguetas nos cenários com aumento de temperatura, principalmente na semeadura de outubro (Figura 8d).

A cultivar EPAGRI 109 apresentou os maiores rendimentos de grãos, atingindo valores de até $12,5 \text{ Mg ha}^{-1}$, na semeadura de agosto (Figura 9a). O número de espiguetas produzidas foi maior nos meses de agosto e setembro, diminuindo com o atraso na data de semeadura (Figura 9b). O efeito dos cenários climáticos no número de espiguetas da cultivar EPAGRI 109 foi mais expressivo nas semeaduras de julho e agosto, com menor número de espiguetas nos cenários com os maiores aumentos na temperatura do ar. As baixas temperaturas causaram muita esterilidade de espiguetas por frio na semeadura de janeiro, principalmente nos cenários 'Atual' e '2xCO₂', diminuindo com o aumento da temperatura do ar nos cenários seguintes (Figura 9c). Esta esterilidade de espiguetas por frio resultou em rendimentos de grãos muito baixos na semeadura de janeiro, confirmando e reforçando a

premissa de que quanto mais longo for o ciclo de desenvolvimento da cultivar, mais cedo deve ser feita a semeadura no local de estudo. A esterilidade de espiguetas causada pelo calor foi maior na semeadura de setembro, no cenário '+5°C' (Figura 9d).

A mudança média percentual do rendimento simulado nos cenários de mudança climática está na Figura 11. Para a cultivar IRGA 421 a mudança média percentual no rendimento de grãos, apresentada na Figura 11a, indica que as semeaduras de julho e agosto são desfavoráveis em todos os cenários climáticos. Para cultivares muito precoces, como é o caso da IRGA 421, semeaduras realizadas muito cedo resultam em grande esterilidade de espiguetas pelo frio (Figura 7c) e pouca produção de biomassa, pois a temperatura do ar e a disponibilidade de radiação solar ainda não estão ideais para o crescimento e desenvolvimento da cultura (Figura 10). A semeadura no mês de outubro no cenário '2xCO₂' apresentou o maior desvio positivo de rendimento, mas com aumento de 2°C, ou mais na temperatura média do ar, a semeadura no mês de novembro passou a ser mais favorável. Nesta cultivar observa-se que os incrementos no rendimento na semeadura de dezembro foram sempre inferiores aos meses de outubro e novembro nos cenários com aumento de até 4°C, mas o rendimento tendeu a se igualar nas semeaduras de novembro e dezembro no cenário '+5°C'. Estes resultados indicam que deverá haver adaptações na época preferencial de semeadura das cultivares muito precoces (outubro e novembro) caso este cenário com maior aumento de temperatura venha a se confirmar.

As simulações para a cultivar IRGA 417 indicam uma mudança percentual negativa do rendimento de grãos nas semeaduras realizadas em julho e janeiro para todos os cenários, e em agosto a partir do cenário '+4°C' (Figura 11b). A data de semeadura que resultou nos maiores rendimentos de grãos desta cultivar, para o cenário '2xCO₂' foi em setembro. Já a partir de 1°C de aumento na temperatura do ar, o maior incremento de rendimento passou a ser com a semeadura no mês de outubro, até o cenário '+3°C', e a partir de '+4°C' o mês de novembro foi o mais favorável para a semeadura da cultivar IRGA 417.

A cultivar EPAGRI 109 apresentou diminuição do rendimento de grãos, em relação à época de semeadura preferencial do cenário 'Atual', nos meses de dezembro e janeiro independente do cenário considerado (Figura 11c), indicando a necessidade de se realizar a semeadura antecipada nas cultivares de ciclo longo independente do aumento de temperatura do ar em cenários climáticos futuros. Os desvios negativos, presentes nas semeaduras de dezembro e janeiro, ficaram menores com o aumento da temperatura do ar nos cenários de mudança climática, indicando que as baixas temperaturas enfrentadas pela cultivar em semeaduras tardias foram responsáveis por este desvio negativo. Como pode ser observado na

Figura 11c, para cultivar a EPAGRI 109 houve menor influência dos cenários climáticos nos desvios positivos da mudança no rendimento em relação ao cenário 'Atual', indicando que esta cultivar já possui um alto potencial produtivo e, portanto, em cenários futuros seu rendimento potencial não será alterado de maneira tão expressiva como nas cultivares de ciclo precoce e muito precoce.

Um das questões frequentemente levantadas por orizicultores e técnicos envolvidos na cadeia produtiva do arroz é se haverá, ou deverá haver alteração no período recomendado para semeadura do arroz, se o aquecimento global associado à mudança climática acontecer. Os resultados deste estudo (Figura 11), de maneira geral, indicam que o período recomendado atualmente para a semeadura do arroz irrigado na região da Depressão Central do estado do RS poderá ser ampliado em cenários de mudança climática, pois nas três cultivares, e em praticamente todos os cenários considerados, observa-se que a mudança média percentual, em relação ao cenário atual, foi positiva na maioria das datas de semeadura avaliadas. Destaca-se ainda que este estudo foi realizado com o modelo Infocrop sem a interferência de fatores bióticos sobre a cultura do arroz. Adaptação de práticas de manejo visando controle de pragas, doenças e plantas daninhas em cenários futuros devem ser consideradas nos ajustes da data de semeadura que a lavoura arrozeira poderá necessitar para manter sua sustentabilidade para as próximas gerações.

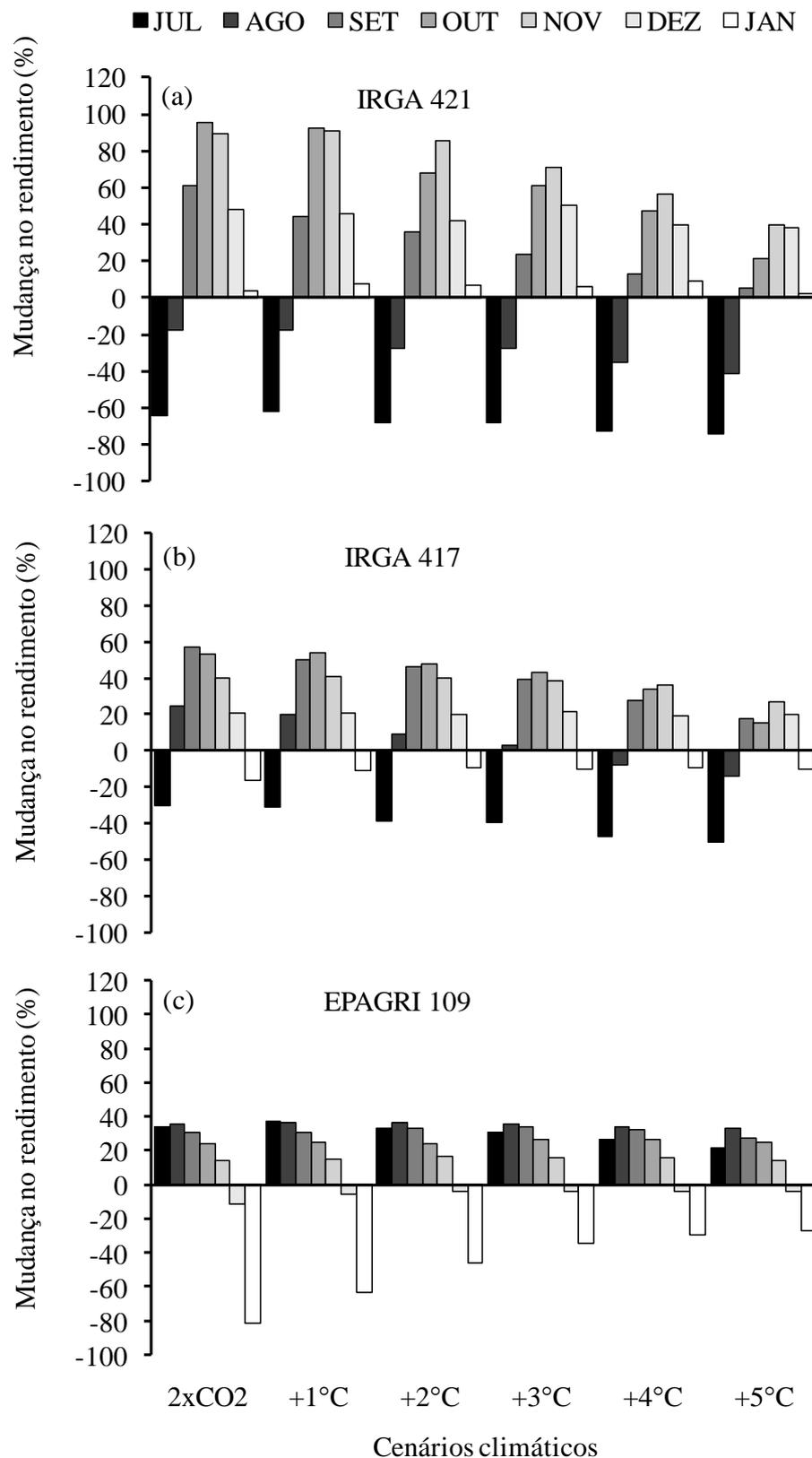


Figura 11 – Mudança média percentual no rendimento simulado de grãos de arroz irrigado em cenários de mudança climática e em sete datas de semeadura com intervalos mensais, de 20 de julho (JUL) a 20 de janeiro (JAN), indicados no painel (a), em relação ao rendimento do cenário atual (sem mudança) nas datas de semeadura recomendadas atualmente para as cultivares IRGA 421 (a), IRGA 417 (b) e EPAGRI 109 (c).

5 CONCLUSÕES

O modelo InfoCrop, após adaptado para cultivares locais, tem desempenho satisfatório para a simulação do rendimento de grãos de arroz irrigado em Santa Maria, RS.

O rendimento de grãos de arroz irrigado simulado com o modelo InfoCrop aumenta nos cenários de mudança climática em relação ao cenário atual (sem mudança), em cultivares de ciclo desde muito precoce até ciclo longo, sendo as cultivares muito precoces mais beneficiadas pelo aumento de CO₂ do que cultivares de ciclo longo.

Com o aumento da concentração de CO₂ na atmosfera e da temperatura média do ar o período de semeadura recomendado atualmente para cultivares de arroz irrigado pode ser ampliado.

REFERÊNCIAS

AGGARWAL, P. K. et al. 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, 2006a.

_____ et al. InfoCrop: A dynamic simulation model for the assessment of crop yields, losses due to pests, and environmental impact of agro-ecosystems in tropical environments. II. Performance of the model. **Agricultural Systems**, Netherlands, v. 89, p. 47-67, 2006b.

_____; MALL, R. K. Climate change and rice yields in diverse agro-environments of India. II. Effect of uncertainties in scenarios and crop models on impact assessment. **Climatic Change**, Netherlands, v. 52, p. 331-343, 2002.

ASSAD, E. D. et al. Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 11, p. 1057-1064, nov. 2004.

_____ et al. **Variação espacial para o cultivo do arroz no Brasil conforme prognósticos de mudanças climáticas**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa, 2005. 4 p. (Comunicado Técnico, 108).

_____; PINTO, H. S. **Aquecimento global e a nova geografia da produção agrícola no Brasil**. São Paulo: Embrapa, 2008. 84 p.

BACK, A. J. Aplicação de análise estatística para identificação de tendências climáticas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília v. 36, n. 5, p. 717-726, 2001.

BERLATO, M. A.; FONTANA, D. C. **El niño e La niña: impactos no clima, na vegetação e na agricultura do Rio Grande do Sul; aplicações de previsões climáticas na agricultura**. Porto Alegre: UFRGS, 2003. 110 p.

BOUMAN, B. A. M. et al. **ORYZA 2000: modeling lowland rice**. Version 2.12, November, 2004. In: Cereal Knowledge Bank, International Rice Research Institute. Disponível em: <<http://www.knowledgebank.irri.org/oryza2000/default.htm>>. Acesso em: 20 maio 2008.

BUTTERFIELD, R. E.; MORISON, J. I. L. Modeling the impact of climate warming on winter cereal development. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 62, n. 3, p. 241-261, 1992.

CAMARGO, E. R. et al. Influência da aplicação de nitrogênio e fungicida no estágio de emborrachamento sobre o desempenho agrônômico do arroz irrigado. **Bragantia**, Campinas, v. 67, n. 1, p. 153-159, 2008a.

_____ et al. Manutenção da área foliar e produtividade de arroz irrigado com a aplicação de fertilizantes foliares no estágio de emborrachamento. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 5, p. 1439-1442, 2008b.

COCK, J.H.; YOSHIDA, S. Accumulation of ¹⁴C-labelled carbohydrate before flowering and the subsequent redistribution and respiration in the rice plant. **Proceedings of the Crop Science Society of Japan**, Japan, v. 41, p. 226-234, 1972.

CONFALONIERI, R. et al. Multi-metric evaluation of the models WARM, CropSyst, and WOFOST for rice. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 220, p. 1395-1410, 2009.

COUNCE, P.; KEISLING, T.C.; MITCHELL, A.J. A uniform, objective, and adaptive system for expressing rice development. **Crop Science**, Madison, v.40, n.2, p. 436-443, 2000.

ESTEFANEL, V. et al. Insolação e radiação solar na região de Santa Maria, RS: I. Estimativa da radiação solar global incidente a partir dos dados de insolação. **Revista do Centro de Ciências Rurais**, Santa Maria, v. 20, n. 3-4, p. 203-218, 1990.

FAGERIA, N. K. et al. **Manejo da fertilidade do solo para o arroz irrigado**. 1 ed. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2003. 250 p.

FONTANA, D. C.; BERLATO, M. A. Influência do El niño oscilação sul sobre a precipitação pluvial no estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 127-132, 1997.

FREITAS, J. G. et al. Resposta de cultivares de arroz irrigado ao nitrogênio. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 58, n. 3, p. 573-579, 2001.

GONÇALVES, R. R. V.; ASSAD, E. D. Análise de tendências de temperatura mínima do Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 16., 2009, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: [s.n.], 2009. 1 CD-ROM.

HULME, M.; ZHAO, Z. C.; JIANG, T. Recent and future climate change in East Asia. **International Journal of Climatology**, v. 14, n. 4, p. 637-658, 1994.

HUNT, L. A. et al. Postanthesis temperature effects on duration and rate of grain filling in some winter and spring wheats. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, v. 71, n. 5, p. 609-617, 1991.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **Climate change 2001: the scientific bases – The contribution of the working group I of the third assessment report**. Cambridge: Cambridge University, 2001. 944 p.

_____. **Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge: Cambridge University, 2007. 996 p.

INSTITUTO RIO GRANDENSE DO ARROZ - IRGA. **Dados de safra**. Porto Alegre, 2009. Disponível em: <http://www.irga.rs.gov.br/index.php?action=dados_safra>. Acesso em: 20 out. 2009.

_____. **Publicações**. Apresentação CENSO 2005. Porto Alegre, 2005. Disponível em: <<http://www.irga.rs.gov.br/arquivos/20060524160029.pdf>>. Acesso em: 10 abr. 2008.

JANSSEN, P. H. M.; HEUBERGER, P. S. C. Calibration of process – oriented models. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 83, n. 1-2, p. 55-56, 1995.

KERR, R. A. Millennium's hottest decade retains its title, for now. **Science**, Washington, v. 307, p. 828-829, 2005.

KIMBALL, B. A. et al. Effects of increasing atmospheric CO₂ on vegetation. **Vegetatio**, v. 104-105, p. 65-75, 1993.

KINIRY, J. R. et al. Rice Parameters Describing Crop Performance of Four U.S. Cultivars. **Agronomy Journal**, Madison, v. 93, p. 1354-1361, 2001.

KRISHNAN, P. et al. Impact of elevated CO₂ and temperature on rice yield and methods of adaptation as evaluated by crop simulation studies. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 122, p. 233-242, 2007.

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.

LAGO, I. **Desenvolvimento do arroz e do arroz vermelho**: modelagem e resposta à mudança climática. 2008. 94 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

_____ et al. Impact of increasing mean air temperature on the development of rice and red Rice. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 11, p. 1441-1448, 2008.

LAL, M. et al. Vulnerability of rice and wheat yields in NW India to future changes in climate. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 89, p. 101-114, 1998.

LONG, S. P. Modification of the response of photosynthetic productivity to rising temperature by atmospheric CO₂ concentrations: Has its importance been underestimated? **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v. 14, n. 6, p. 729-739, 1991.

LUZZARDI, R. et al. Avaliação preliminar da produtividade em campo e qualidade industrial de híbridos de arroz no Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 4.; REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 26., 2005, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado, 2005. v. 1, p. 70-72.

MACHADO, E. C. et al. Trocas de CO₂, acúmulo de fitomassa e remobilização de reservas durante o crescimento de panículas de duas cultivares de arroz. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Campinas, v. 2, n. 1, p. 63-70, 1990.

MAHLMAN, J. D. Uncertainties in projections of human induced climate warnings. **Science**, Washington, v. 278, n. 5342, p. 1416-1417, 1997.

MANN, M. E. et al. Global-Scale Temperature Patterns and Climate Forcing Over the Past Six Centuries, **Nature**, London, v. 392, p. 779-787, 1998.

_____ et al. Northern Hemisphere Temperatures During the Past Millennium: Inferences, Uncertainties, and Limitations, **Geophysical Research Letters**, v. 26, n. 6, p. 759-762, 1999.

MARCHESAN, E. et al. Manejo da irrigação em cultivares de arroz no sistema pré-germinado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, n. 4, p. 45-50, 2007.

MARIOT, C. H. P. et al. Ensaio bioclimático de arroz irrigado nas regiões da planície costeira externa e fronteira oeste do RS – safra 2008/09. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 6., 2009, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado, 2009. p. 72-75.

MATSUI, T. et al. Effects of high temperature and CO₂ concentration on spikelet sterility in indica rice. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 51, p. 213-219, 1997a.

_____; OMASA, K.; HORIE, T. High temperature-Induced Spikelet Sterility of Japonica Rice at flowering in relation to air temperature, humidity and wind velocity conditions. **Japanese Journal of Crop Science**, Japan, v. 66, p. 449-455, 1997b.

MATTHEWS, R. B. et al. Simulating the impact of climate change on rice production in Asia and evaluating options for adaptation. **Agricultural Systems**, Netherlands, v. 54, n. 3, p. 399-425, 1997.

McINTYRE, S.; MCKITRICK, R. Corrections to the Mann et. al. (1998) proxy data base and northern hemispheric average temperature series. **Energy & Environment**, v. 14, n. 6, p. 751-771, 2003.

_____. The M&M Critique of the MBH98 Northern Hemisphere climate index: update and implications. **Energy & Environment**, v. 16, n.1, p. 69-100, 2005a.

_____. Hockey sticks, principal components, and spurious significance. **Geophysical Research Letters**, v. 32, L03710, 2005b.

MOLION, L. C. B. Aquecimento global: uma visão crítica. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 3-4, p. 7-24, 2008.

MONTEITH, J. L.; SCOTT, R. K. Weather and yield variation of crops. In: BLAXTER, K.; FOWDEN, L. **Food, nutrition and climate**. Englewood Cliffs: Applied science, 1982. p. 127-149.

PAULA, G. M. **O fenômeno El niño oscilação sul e a erosividade das chuvas em Santa Maria – RS**. 2009. 55 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

PENG, S. et al. (Eds.) **Climate Change and Rice**. Los Banos, Philippines: International Rice Research Institute - IRRI, 1995. 377 p.

RICHTER, G. M.; SEMENOV, M. A. Modelling impacts of climate change on wheat yields in England and Wales: assessing drought risks. **Agricultural Systems**, Netherlands, v. 84, n. 1, p. 77-97, 2005.

ROSENBERG, N. J. et al. **Microclimate: the biological environment**. New York: John Wiley & Sons, 1983. 495 p.

SANTOS, F. M. et al. Controle químico de arroz-vermelho na cultura do arroz irrigado. **Planta Daninha**, Londrina, v. 25, n. 2, p. 405-412, 2007.

SEMENOV, M. A. et al. Comparison of the WGEN and LARSWG stochastic weather generators for diverse climates. **Climate Research**, London, v. 10, n. 1, p. 95-107, 1998.

SHAYKEWICH, C. F. An appraisal of cereal crop phenology modeling. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, v. 75, n. 2, p. 329-341, 1995.

SHEEHY, J. E.; MITCHELL, P. L.; HARDY, B. (Ed.). **Charting new pathways to C₄ rice**. Los Baños, Philippines: International Rice Research Institute - IRRI. 2007. 422 p.

SINGH, U.; RITCHIE, J. T.; GODWIN, D. C. **A Users Guide to CERES Rice v2.10. : simulation manual**. Muscle Shoals, AL, USA: International Fertilizer Development Center, 1993. 131 p.

SIONIT, N. et al. Interaction of temperature and CO₂ enrichment on soybean: photosynthesis and seed yield. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, v. 67, n. 5, p. 629-636, 1987.

SIQUEIRA, O. J. W. et al. Potential effects of global climate changes for Brazilian agriculture and adaptive strategies for wheat, maize and soybean. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 2, n. 1, p. 115-129, 1994.

_____ et al. Mudanças climáticas projetadas através dos modelos GISS e reflexos na produção agrícola brasileira. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 8, n. 2, p. 311-320, 2000.

_____ et al. Efeitos potenciais das mudanças climáticas na agricultura brasileira e estratégias adaptativas para algumas culturas. In: LIMA, M. A.; CABRAL, O. M. R.; MIGUEZ, J. D. G. **Mudanças climáticas globais e a agropecuária brasileira**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2001. p. 33-63.

SOLTANI, A. et al. Simulating GFDL Predicted Climate Change Impacts on Rice Cropping in Iran. **Journal of Agricultural Science and Technology**, v. 3, p. 81-90, 2001.

SOCIEDADE SUL BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO. **Arroz irrigado:** recomendações técnicas da pesquisa para o sul do Brasil. Pelotas: SOSBAI, 2007. 161 p.

STAPPER, M.; HARRIS, H. C. Assessing de productivity of wheat genotypes in a Mediterranean climate, using a crop simulation model. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 20, p. 129-152, 1989.

STEINMETZ, S. Influência do clima na cultura do arroz irrigado no Rio Grande do Sul. In: GOMES, A. S.; MAGALHÃES Jr., A. M. **Arroz irrigado no Sul do Brasil**. 1. ed. Brasília: Embrapa, 2004. cap. 2, p. 45-74.

_____ et al. Impacto do aquecimento global sobre a duração da fase vegetativa do arroz irrigado, estimada pelo método de graus-dia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DA CADEIA PRODUTIVA DE ARROZ, 2.; REUNIÃO NACIONAL DA PESQUISA DE ARROZ, 8., 2006, Brasília. **Anais...** Brasília: Embrapa Arroz e Feijão, 2006. 1 CD-ROM.

STRECK, N. A. Climate change and agroecosystems: the effect of elevated atmospheric CO₂ and temperature on crop growth, development, and yield. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 3, p. 730-740, 2005.

_____; 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, 2006.

_____ et al. Duração do ciclo de desenvolvimento de cultivares de arroz em função da emissão de folhas no colmo principal. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 4, p. 1086-1093, 2006.

_____ et al. Comparação de parâmetros de crescimento e de desenvolvimento de dois biótipos de arroz vermelho com genótipos de arroz irrigado. **Bragantia**, Campinas, v. 67, n. 2, p. 349-360, 2008a.

_____ et al. O fenômeno El niño oscilação sul e a variabilidade interanual da evaporação do tanque Classe A e da umidade relativa do ar em Santa Maria, RS. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.38, n.5, p.1452-1455, 2008b.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3. ed. Porto Alegre: Artemed, 2004. 719 p.

TAO, F, et al. Climate changes and trends in phenology and yields of field crops in China, 1981–2000. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 138, p. 82-92, 2006.

_____ et al. Global warming, rice production, and water use in China: developing a probabilistic assessment. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 148 p. 94-110, 2008.

THOMAS, A. Climatic changes in yield index and soil water deficit trends in China. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 102, n. 2-3, p. 71-81, 2000.

TUBIELLO, F. N. et al. Effects of climate change and elevated CO₂ on cropping systems: model predictions at two Italian locations. **European Journal of Agronomy**, v. 13, p. 179-189, 2000.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE, Foreign Agricultural Service. **Production, Supply and Distribution Online: Custom Query**. USDA, 2009. Disponível em: <<http://www.fas.usda.gov/psdonline/psdQuery.aspx>>. Acesso em: 15 ago. 2009.

Von STORCH, H. et al. Reconstructing Past Climate from Noisy Data. **Science**, Washington, v. 306, p. 679-682, out. 2004.

VU, J. C. V. et al. Effects of elevated CO₂ and temperature on photosynthesis and Rubisco in rice and soybean. **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v. 20, n. 1, p. 68-76, 1997.

VILLA, S. C. C. et al. Controle de arroz-vermelho em dois genótipos de arroz (*Oryza sativa*) tolerantes a herbicidas do grupo das imidazolinonas. **Planta Daninha**, Londrina, v. 24, n. 3, p. 549-555, 2006.

WEBER, L. et al. Cultivares de arroz irrigado e nutrientes na água de drenagem em diferentes sistemas de cultivos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 1, p. 27-33, 2003.

WEERAKOON, W. M. W.; INGRAM, K. T.; MOSS, D. N. Atmospheric carbon dioxide and fertilizer nitrogen effects on radiation interception by rice. **Plant and Soil**, v. 220, p. 99-106, 2000.

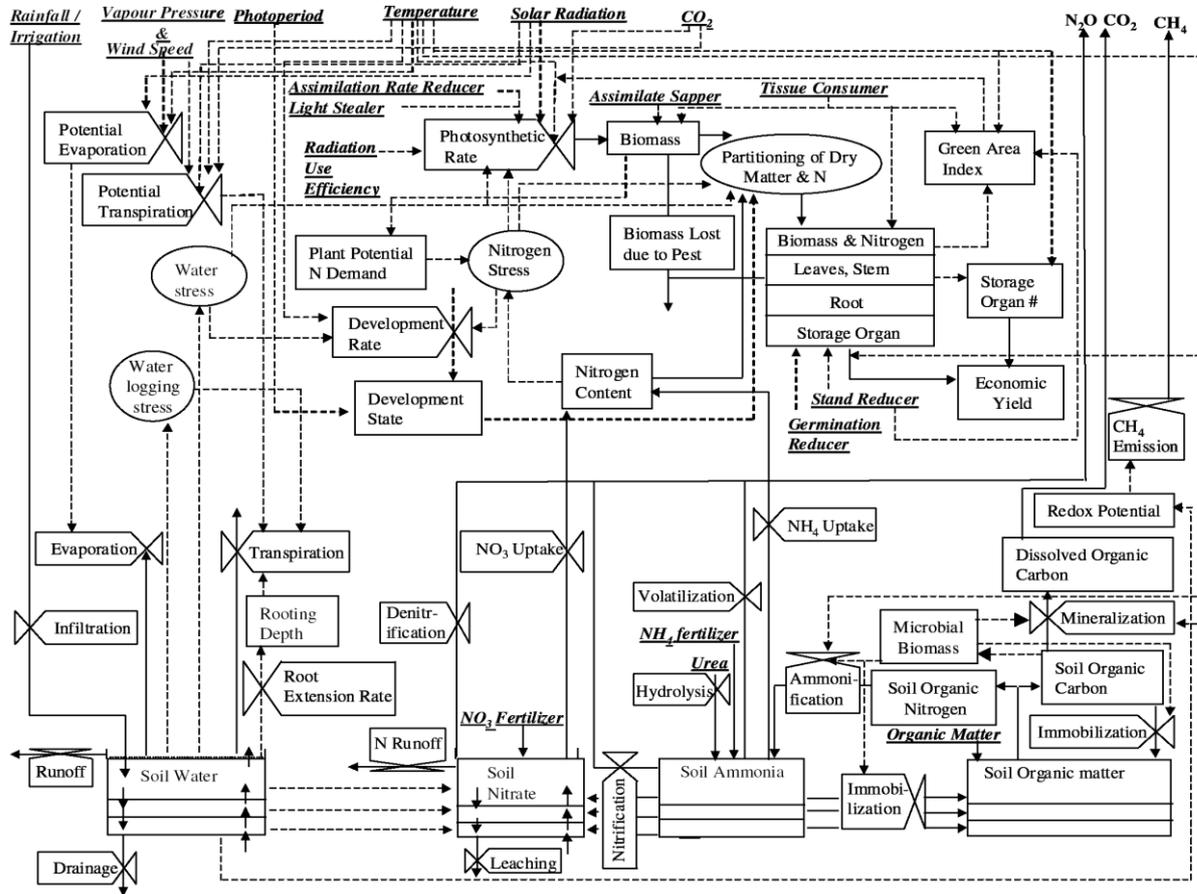
WEISS, A.; HAYS, C. J.; WON, J. Assessing winter wheat responses to climate change scenarios: a simulation study in the U.S. great plains. **Climatic Change**, Netherlands, v. 58, p. 119-147, 2003.

WIEGAND, C. L.; CUELLAR, J. A. Duration of grain filling and kernel weight of wheat as affected by temperature. **Crop Science**, Madison, v. 21, n. 1, p. 95-101, 1981.

YANG, L. et al. Seasonal changes in the effects of free-air CO₂ enrichment (FACE) on dry matter production and distribution of rice (*Oryza sativa* L.). **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 98, p. 12-19, 2006.

YAO, F. et al. Assessing the impacts of climate change on rice yields in the main rice areas of China. **Climatic Change**, Netherlands, v. 80, p. 395-409, 2007.

ANEXO A – Fluxograma do modelo InfoCrop (Aggarwal et al., 2006a)



ANEXO B – Detalhes da análise estatística referente ao teste t, usada para comparar dados de rendimento de grãos de arroz irrigado observados em Santa Maria, RS, e simulados com o modelo InfoCrop.

=====

ASSISTAT Versão 7.5 beta (2008) - Homepage <http://www.assistat.com>
 Por Francisco de A. S. e Silva DEAG-CTRN-UFCG - Atualiz.30/05/2009

=====

Arquivo testeT do modelo - fator 1 OBSERVADO FATOR 2 SIMULADO
 Data 01/01/2010 Hora 21:32:39

EXPERIMENTO INTEIRAMENTE CASUALIZADO

QUADRO DE ANÁLISE

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos	1	6613966.60195	6613966.60195	1.8901 ns
Resíduo	42	146966176.2119	3499194.67171	
Total	43	153580142.8139		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)
 * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)
 ns não significativo ($p \geq .05$)

GL: 1, 42 F-krit(5%) = 4.0727 F = 1.8901 p > .10000

MÉDIAS E MEDIDAS

Médias de tratamento

1	6827.06700 a
2	7602.48300 a

DMS = 1137.69100

MG = 7214.77486 CV% = 25.92754

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste t ao nível de 5% de probabilidade

DADOS

Os dados não foram apresentados porque a tabela excede a largura desta tela

Para cálculo dos valores críticos de F e da probab. de F calculado, o Assistat utiliza o Algoritmo 724 (Abernathy, Roger W. & Smith, Robert P. Algorithm 724: Program to calculate F-percentiles. ACM Trans. Math. Softw. 19, No.4, 481-483(1993).)

SIGLAS E ABREVIACÕES

UFCG = Universidade Federal de Campina Grande
CTRN = Centro de Tecnologia e Recursos Naturais
DEAG = Departamento de Engenharia Agrícola
F.V. = Fonte de variação G.L. = Graus de liberdade
S.Q. = Soma de quadrado Q.M. = Quadrado médio
F = Estatística do teste F MG = Média geral
CV% = Coeficiente de variação em %
DMS = Diferença mínima significativa

NOTA

Quando o F fica muito próximo mas não atinge a significância poderá haver diferença significativa entre a maior e a menor média. Também poderá não haver diferença significativa entre médias quando o F é significativo porém muito próximo da não significância. Isso é limitação da aplicação conjunta dos testes F e de Tukey, citada por Frederico Pimentel Gomes no seu livro; Curso de EXTATÍSTICA EXPERIMENTAL(ver o item 3.3)

REFERÊNCIAS DO ASSISTAT

Silva, F. de A. S. e. & Azevedo, C. A. V. de. A New Version of The Assistat-Statistical Assistance Software. In: WORLD CONGRESS ON COMPUTERS IN AGRICULTURE, 4, Orlando-FL-USA: Anais... Orlando: American Society of Agricultural Engineers, 2006. p.393-396.

Silva, F. de A. S. e. & Azevedo, C. A. V. de. Versão do programa computacional Assistat para o sistema operacional Windows. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande, v.4,n.1, p71-78,2002.

Silva, F.de A.S.e. The ASSISTAT Software: statistical assistance. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTERS IN AGRICULTURE, 6, Cancun, 1996. Anais... Cancun: American Society of Agricultural Engineers, 1996. p.294-298.