

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

Ioran Guedes Rossato

**RESTRIÇÃO DE RADIAÇÃO SOLAR NA PRODUTIVIDADE DE ARROZ
IRRIGADO**

Santa Maria, RS

2021

Ioran Guedes Rossato

**RESTRIÇÃO DE RADIAÇÃO SOLAR NA PRODUTIVIDADE DE
ARROZ IRRIGADO**

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Agrícola.**

Orientador: Prof. Dr. Alencar Junior Zanon

Coorientador: Prof. PhD. Nereu Augusto Streck

Santa Maria, RS

2021

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001

Rossato, Ioran Guedes
Restrição de radiação solar na produtividade de arroz irrigado / Ioran Guedes Rossato.- 2021.
60 p.; 30 cm

Orientador: Alencar Junior Zanon
Coorientadores: Nereu Augusto Streck, Alexandre Bryan Heinemann, Michel Rocha da Silva
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola, RS, 2021

1. Arroz irrigado 2. Restrição de radiação solar 3. Sombreamento 4. Desenvolvimento 5. Produtividade I. Zanon, Alencar Junior II. Streck, Nereu Augusto III. Heinemann, Alexandre Bryan IV. Silva, Michel Rocha da V. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

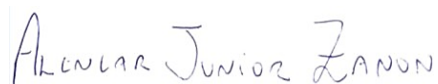
Declaro, IORAN GUEDES ROSSATO, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

Ioran Guedes Rossato

**RESTRIÇÃO DE RADIAÇÃO SOLAR NA PRODUTIVIDADE DE
ARROZ IRRIGADO**

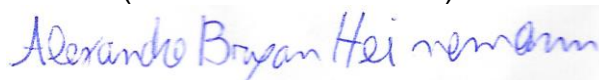
Dissertação apresentada ao curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Agrícola.**

Aprovada em 19 de julho de 2021



Alencar Junior Zanon. Dr. (UFSM)

(Presidente/Orientador)



Alexandre Bryan Heinemann, Dr. (Embrapa) - Videoconferência



Michel Rocha da Silva, Dr. (CropsTeam) - Videoconferência

Santa Maria, RS

2021

AGRADECIMENTOS

A Deus, por estar sempre ao meu lado em cada tomada de decisão, dificuldade e batalha vencida.

Aos meus pais Jairo e Elizete, por não medirem esforços para que este momento se tornasse possível, e meus irmãos Braylan e Thyrsah por toda paciência e compreensão.

À Universidade Federal de Santa Maria e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola pela oportunidade de ter realizado o Mestrado.

Aos meus orientadores e amigos, Prof. Alencar Junior Zanon e Prof. Nereu Augusto Streck, pelo grande exemplo de profissionalismo, ética e humanidade. Obrigado por participarem da minha formação e por confiarem no meu potencial.

À minha namorada Victória, pelo amor e suporte em todos os momentos dessa jornada. Tua presença foi um grande combustível e espero poder retribuir na mesma magnitude.

Aos colegas da Equipe FieldCrops e Simanihot, com os quais pude dividir e compartilhar momentos incríveis e muito conhecimento. Agradeço em especial ao Michel e a Giovana por me acolherem na Equipe Arroz e fazerem parte do que hoje sou. Agradeço, também, pelos momentos de parceria junto aos amigos Anderson, Lorenzo, Mariano e Vladison.

Ao IRGA e a Unipampa, pelo auxílio na condução dos experimentos e por acreditarem que esse trabalho é importante para a cadeia orizícola.

À CAPES, pelo auxílio financeiro através de bolsa de mestrado.

A todos outros que diretamente ou indiretamente contribuíram para que esse sonho fosse realizado, minha gratidão eterna.

ΕΠΪΓΡΑΦΕ

“Everybody wants to go to heaven but nobody wants to die.” – (Joe Louis)

RESUMO

RESTRIÇÃO DE RADIAÇÃO SOLAR NA PRODUTIVIDADE DE ARROZ IRRIGADO

AUTOR: Ioran Guedes Rossato

ORIENTADOR: Alencar Junior Zanon

O potencial de produtividade de arroz (*Oryza sativa* L.) é definido pela disponibilidade de radiação solar durante o ciclo de desenvolvimento. A redução na disponibilidade de radiação solar devido as mudanças climáticas e em anos de El Niño no Sul do Brasil podem reduzir a produtividade do arroz. Os objetivos deste estudo são: 1) determinar a fase do desenvolvimento em que a produtividade é penalizada pela restrição de radiação solar e 2) quantificar a redução de produtividade em um dia nublado nas fases vegetativa, reprodutiva e enchimento de grãos. Foram utilizadas telas com 24%, 36% e 43% de restrição da radiação solar incidente nas fases vegetativa, reprodutiva e de enchimento de grãos, além de um tratamento testemunha. Os experimentos foram conduzidos em 4 locais (Cachoeirinha, Santa Maria, Agudo e Itaqui) nas safras 2017/18 e 2018/19 no Rio Grande do Sul, Brasil. A penalização na produtividade devido à restrição de radiação solar foi maior na fase de enchimento de grãos ($142,1 \text{ kg ha}^{-1}\text{dia}^{-1}$), seguida da fase reprodutiva ($126,1 \text{ kg ha}^{-1}\text{dia}^{-1}$) e vegetativa ($28,1 \text{ kg ha}^{-1}\text{dia}^{-1}$). Estes resultados são importantes para otimizar o manejo da época de semeadura e para direcionar os programas de melhoramento genético na busca de cultivares mais eficientes no uso da radiação solar.

Palavras-chave: *Oryza sativa* (L); restrição de radiação solar; produtividade; desenvolvimento.

ABSTRACT

SOLAR RADIATION RESTRICTION ON FLOODED RICE YIELD

AUTHOR: Ioran Guedes Rossato

ADVISOR: Alencar Junior Zanon

Rice (*Oryza sativa* L.) yield potential is defined by the availability of solar radiation during the growing season. The reduction of solar radiation pointed out by future climate change scenarios and in “El Niño” years in Southern Brazil can reduce crop yield. The objectives of this study are to indicate at which development phase the productivity is most penalized as a result of solar radiation restriction, and to estimate how much the crop fails to produce on a cloudy day at each development phase. Were used screens with 24%, 36% and 43% restriction intensity of incident solar radiation at vegetative, reproductive and grain filling phases besides a control treatment with 0% solar radiation restriction. The field experiments were conducted at 4 sites (Cachoeirinha, Santa Maria, Agudo e Itaqui) during the growing seasons 2017/18 e 2018/19 in Rio Grande do Sul, Brazil. We identified that the penalty on productivity as a result of solar radiation restriction is more intense during grain filling (142,1 kg ha⁻¹dia⁻¹), followed by the reproductive phase (126,1 kg ha⁻¹dia⁻¹) and vegetative phase (28,1 kg ha⁻¹dia⁻¹). These results are important to optimize the sowing date management and to direct genetic improvement programs in the search for more efficient cultivars in the solar radiation use.

Index terms: *Oryza sativa* (L); solar radiation restriction; shading; yield.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Metade do Sul do Rio Grande do Sul e sua subdivisão nas regiões orizícolas estabelecidas pelo IRGA: Fronteira Oeste (1), Campanha (2), Região Central (3), Planície Costeira Interna (4), Planície Costeira Externa (5) e Zona Sul (6)..... 19

Artigo 1 - Quanto o arroz deixa de produzir por dia nublado em ambiente subtropical?

Figura 1. (A) Panorama global e destaque para o Brasil, preenchido em preto. (B) Metade sul do RS inserida no cenário brasileiro, em azul. (C) Incidência de radiação solar na metade sul do RS durante a estação de crescimento do arroz irrigado (médias do período setembro-abril). Os pontos pretos indicam os locais de realização dos experimentos durante as estações de crescimento 2017/18 e 2018/19..... 30

Figura 2. Radiação solar média mensal (SolRad, em MJ m⁻²dia⁻¹), Temperatura média mensal (Tmed, em °C) e Precipitação acumulada mensal (Prec, em mm) durante as estações de crescimento 2017/2018 em Cachoeirinha (A), Santa Maria (B) e Itaqui (C) e 2018/2019 em Cachoeirinha (D), Agudo (E) e Itaqui (F). As curvas de RadSol (pontilhada) e Tmed (contínua) estão relacionadas com o eixo Y da esquerda, enquanto as colunas que indicam a Prec estão relacionadas com o eixo Y secundário da direita. As setas azuis indicam a semeadura e as setas vermelhas indicam, respectivamente, os estádios de desenvolvimento V1, R1, R4 e R9 durante as estações de crescimento..... 33

Figura 3. (A) Produtividade de grãos sob diferentes níveis de Radiação solar incidente durante as estações de crescimento 2017/18 e 2018/19 em ambiente subtropical; (B) Produtividade de grãos por fase de desenvolvimento sob os níveis de 0%, 24%, 36% e 43% de Radiação solar incidente durante as estações de crescimento 2017/18 e 2018/19 em ambiente subtropical; (C) Produtividade média entre locais e estações de crescimento sob níveis de Radiação solar incidente de 0% (testemunha, em preto), 24% (laranja), 36% (vermelho) e 43% (azul). A combinação entre forma e cores dos marcadores indica a fase e a

intensidade de restrição de radiação solar, respectivamente. As barras verticais pontilhadas indicam o desvio padrão dos tratamentos. O $p < 0,01$ indica significância a 1% de probabilidade de erro.....38

Figura 4. Número de espiguetas por panícula (NEP) durante o enchimento de grãos sob níveis de restrição de radiação solar de 0%, 24%, 36% e 43% e sua relação com a produtividade. As colunas indicam o NEP total. Colunas preenchidas em preto indicam o número de espiguetas cheias (NEC) e colunas sem preenchimento indicam o número de espiguetas vazias (NEV). As colunas estão relacionadas com o eixo Y da esquerda. A linha vermelha indica a produtividade de grãos e está relacionada com o eixo Y da direita. A linha azul pontilhada indica a regressão linear entre produtividade de grãos e níveis de restrição de radiação solar. As barras de erros indicam a faixa de variação da produtividade nos tratamentos. O $p < 0,01$ indica significância a 1% de probabilidade de erro.....43

Figura 5. (A) Regressão linear entre Produtividade e Coeficiente Fototérmico para a estação de crescimento durante os anos agrícolas 2017/18 e 2018/19 em ambiente subtropical. (B) Regressões lineares entre Produtividade e Coeficiente Fototérmico por fase de desenvolvimento da cultura durante as estações de crescimento 2017/18 e 2018/19 em ambiente subtropical. O $p < 0,01$ indica significância a 1% de probabilidade de erro.....45

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1

- Tabela 1. Experimentos com restrição de radiação solar sobre a cultura do arroz conduzidos durante duas estações de crescimento (2017/18 e 2018/19) em quatro locais do Rio Grande do Sul, Brasil.....31
- Tabela 2. Estimativa de radiação solar disponível em um dia nublado e porcentagem da redução de RadSol em ambiente subtropical durante as estações de crescimento 2017/18 e 2018/19.....34
- Tabela 3. Produtividade entre os níveis de radiação solar e fases de desenvolvimento durante as estações de crescimento 2017/18 e 2018/19 em ambiente subtropical. Letras diferentes indicam diferença significativa entre os tratamentos de acordo com o Teste t (LSD) a 1% de probabilidade de erro.....36
- Tabela 4. Perda de produtividade por dia nublado nas fases de desenvolvimento vegetativa, reprodutiva e de enchimento de grãos durante as estações de crescimento 2017/18 e 2018/19 em ambiente subtropical.....39
- Tabela 5. Altura de plantas e partição de matéria seca total nos níveis de 0% e 24% de restrição de radiação solar durante a fase vegetativa na estação de crescimento 2017/18. Letras diferentes indicam diferença significativa entre os tratamentos de acordo com o Teste t (LSD) a 1% de probabilidade de erro ($p < 0,01$).....41

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	OBJETIVOS.....	18
1.1.1	Objetivo Geral.....	18
1.1.2	Objetivos específicos.....	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1	A CULTURA DO ARROZ IRRIGADO.....	18
2.2	RADIAÇÃO SOLAR: RELAÇÃO COM O POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE DE ARROZ.....	20
2.3	MUDANÇA CLIMÁTICA.....	21
2.4	O FENÔMENO EL NIÑO – OSCILAÇÃO SUL (ENOS).....	23
3	ARTIGO – QUANTO O ARROZ DEIXA DE PRODUZIR POR DIA NUBLADO EM AMBIENTE SUBTROPICAL?.....	25
	Abstract.....	26
	Resumo.....	27
	INTRODUÇÃO.....	28
	MATERIAL E MÉTODOS.....	29
	<i>Descrição da área de estudo.....</i>	<i>29</i>
	<i>Experimentos de campo.....</i>	<i>30</i>
	<i>Dados meteorológicos e avaliações de campo.....</i>	<i>32</i>
	<i>Definição de um dia nublado.....</i>	<i>33</i>
	<i>Perda de produtividade por dia nublado.....</i>	<i>34</i>
	<i>Coeficiente Fototérmico.....</i>	<i>35</i>
	<i>Análises estatísticas.....</i>	<i>35</i>
	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	35
	<i>Produtividade de grãos, componentes de rendimento e perda de produtividade por dia nublado.....</i>	<i>35</i>
	<i>Penalização da produtividade na fase vegetativa.....</i>	<i>40</i>

<i>Penalização da produtividade na fase reprodutiva</i>	41
<i>Penalização da produtividade na fase de enchimento de grãos</i>	42
<i>Relação entre Coeficiente fototérmico e produtividade de grãos</i>	43
CONCLUSÕES	46
AGRADECIMENTOS	46
REFERÊNCIAS	47
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	52
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52

1 INTRODUÇÃO

“O arroz é vital para mais da metade da população mundial. É o grão mais importante na dieta de milhares de Asiáticos, Africanos e Latino Americanos que vivem nos trópicos e subtropicais. Nessas áreas, o aumento populacional é alto e continuará sendo pelo menos até a metade da próxima década e o arroz continuará sendo sua principal fonte de alimento¹.” Há 4 décadas, alguns dos pesquisadores mais importantes sobre o arroz reforçavam a importância do grão para a humanidade e mostravam que a preocupação com a produção de alimentos não é um assunto recente.

As projeções atuais indicam que até 2050 a população mundial aumentará para 9,7 bilhões de pessoas e a segurança alimentar será um grande desafio socioeconômico (ONU, 2020). Além disso, a pressão social pela sustentabilidade exige que a maneira convencional de produzir alimentos seja remodelada através da melhor utilização dos recursos disponíveis, reduzindo o impacto ao ambiente (Cassman, 2003; Lobell et al., 2009; Godfray et al., 2010; Van Ittersum et al., 2013; Yuan et al., 2021). Neste sentido, o arroz é um alimento estratégico para a segurança alimentar e nutricional, fornecendo 21% das calorias da dieta alimentar de 3 bilhões de pessoas (Faostat, 2021). Fora do continente asiático, o Brasil é o maior produtor mundial, produzindo 12 milhões de toneladas anualmente (CONAB, 2021). O Rio Grande do Sul (RS) é responsável por 73% da produção brasileira, em uma área de 1 milhão de hectares (Ribas et al., 2021). O RS apresenta um potencial de produtividade (Y_p) de $14,8 \text{ Mg ha}^{-1}$ e a produtividade média alcançada pelos produtores de arroz é de $7,7 \text{ Mg ha}^{-1}$, indicando que existe uma lacuna de produtividade de 48% que pode ser reduzida através de ajustes das práticas de manejo (Ribas et al., 2021; Duarte Junior et al., 2021).

O Y_p indica a produtividade de uma cultivar quando não há limitações de nutrientes, estresses bióticos e água para seu desenvolvimento (Evans, 1993; Van Ittersum & Rabbinge, 1997). A região subtropical do Brasil apresenta maior Y_p quando comparada às regiões tropicais devido a maior disponibilidade de

¹N.C. Brady, Diretor Geral do *International Rice Research Institute* (IRRI), no prefácio da obra “*Fundamentals of Rice Crop Science*” (Yoshida, 1981).

radiação solar durante a estação de crescimento (Duarte Junior et al., 2021; Heinemann et al., 2019; Yuan et al., 2021) e ao menor risco de danos por baixas temperaturas que ocorrem nas regiões temperadas do mundo (Espe et al., 2016).

Trabalhos que relacionam a restrição de radiação solar com crescimento, desenvolvimento e produtividade de arroz estão sendo desenvolvidos ao redor do mundo (Alridiwirah et al., 2018; Chen et al., 2019; Deng et al., 2015; Kobata et al., 2017; Li et al., 2020; Liu et al., 2014; Tsukaguchi et al., 2018). A tendência de redução da disponibilidade de radiação solar projetada pelos futuros cenários de mudança climática e o aumento da concentração de aerossóis atmosféricos procedentes da alta atividade industrial nas principais regiões produtoras de arroz é o foco desses trabalhos (JMA, 2016; Kobata et al., 2017; Wang et al., 2015). No Sul do Brasil os trabalhos estão associados ao impacto do fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENOS), que ocasiona chuvas acima da média normal climatológica em sua fase quente (El Niño), provocando atraso da data de semeadura (Duarte Junior et al., 2021; Ribas et al., 2021) e reduzindo a disponibilidade de radiação solar durante as fases de desenvolvimento da cultura (Arsego et al., 2020; De Freitas et al., 2020; Custodio, 2015; Klering et al., 2016; Júnior & Sentelhas, 2019b;). Yoshida (1981), relata que a fase de desenvolvimento em que a produtividade é mais penalizada pela restrição de radiação solar ocorre da diferenciação da panícula até o florescimento, seguida pelo enchimento de grãos, sem efeitos significativos durante a fase vegetativa. Porém, estudos básicos como este ainda não foram realizados para as condições de cultivo do ambiente subtropical do Brasil. Além disso, o potencial produtivo das cultivares disponíveis atualmente são maiores do que as utilizadas pelo IRRI nos anos 80 (Peng et al., 2009).

Quantificar a perda de produtividade por dia nublado nas fases de desenvolvimento do arroz irrigado é fundamental para que produtores de arroz ajustem o manejo, afim de mitigar os efeitos da mudança climática e dos anos de El Niño no Sul do Brasil. Além disso, direciona os programas de melhoramento genético para o desenvolvimento de cultivares tolerantes ao sombreamento e mais eficientes no uso da radiação solar.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Determinar em que fase de desenvolvimento do arroz irrigado a produtividade de grãos sofre maior penalização por consequência da restrição de radiação solar em ambiente subtropical.

1.1.2 Objetivos específicos

1. Quantificar o efeito de um dia nublado sobre a produtividade em cada fase de desenvolvimento do arroz irrigado em ambiente subtropical.
2. Identificar o componente de rendimento que sofre maior penalização da restrição de radiação solar por fase de desenvolvimento do arroz irrigado em ambiente subtropical.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A CULTURA DO ARROZ IRRIGADO

O arroz (*Oryza sativa* L.) é uma monocotiledônea, com aparato fotossintético C₃, que pertence à família Poaceae e ao gênero *Oryza* (Kissmann, 1999). A espécie *Oryza sativa* L. é a principal do gênero, pois abrange a maioria das cultivares de arroz utilizadas no mundo, sendo seu centro de origem o continente asiático (Oliveira, 2017). A cultura desempenha uma importante função socioeconômica, pois compõe a base alimentar de mais de 3 bilhões de pessoas e fornece mais de 20% das calorias necessárias à dita humana. Além disso, é a principal fonte de renda para milhões de estabelecimentos rurais pobres ao redor do mundo (Cantrell, 2002).

Mundialmente, são produzidas mais de 755 milhões de toneladas de arroz em 162 milhões de hectares. O continente asiático é responsável por 90,6% dessa produção, seguido pelo continente americano (5,2%) e africano (3,5%) (Faostat, 2021). Nesse cenário, a China é o maior produtor (193,7 milhões de toneladas), seguida da Índia (142,4 milhões de toneladas) e Indonésia (54,8 milhões de toneladas) (Faostat, 2021). O Brasil é o maior produtor de arroz fora da Ásia, contribuindo com 11,2 milhões de toneladas por ano. A Região Sul do Brasil (Paraná, Rio Grande do Sul e Santa Catarina) é responsável por 83% da

produção. O Rio Grande do Sul (RS) é o maior produtor, sendo responsável por 73% da produção nacional (CONAB, 2020; Ribas et al., 2021).

No RS, o cultivo de arroz irrigado está concentrado em mais de 946 mil hectares na metade sul do Estado, onde estão localizados os solos de terras baixas (Figura 1) (Meus et al, 2020). O desenvolvimento de novas cultivares, o processo de mecanização da lavoura e o investimento em pesquisa, como o desenvolvimento do “Projeto 10” do Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA), contribuíram para o avanço na lavoura arrozeira gaúcha (Menezes et al., 2004).

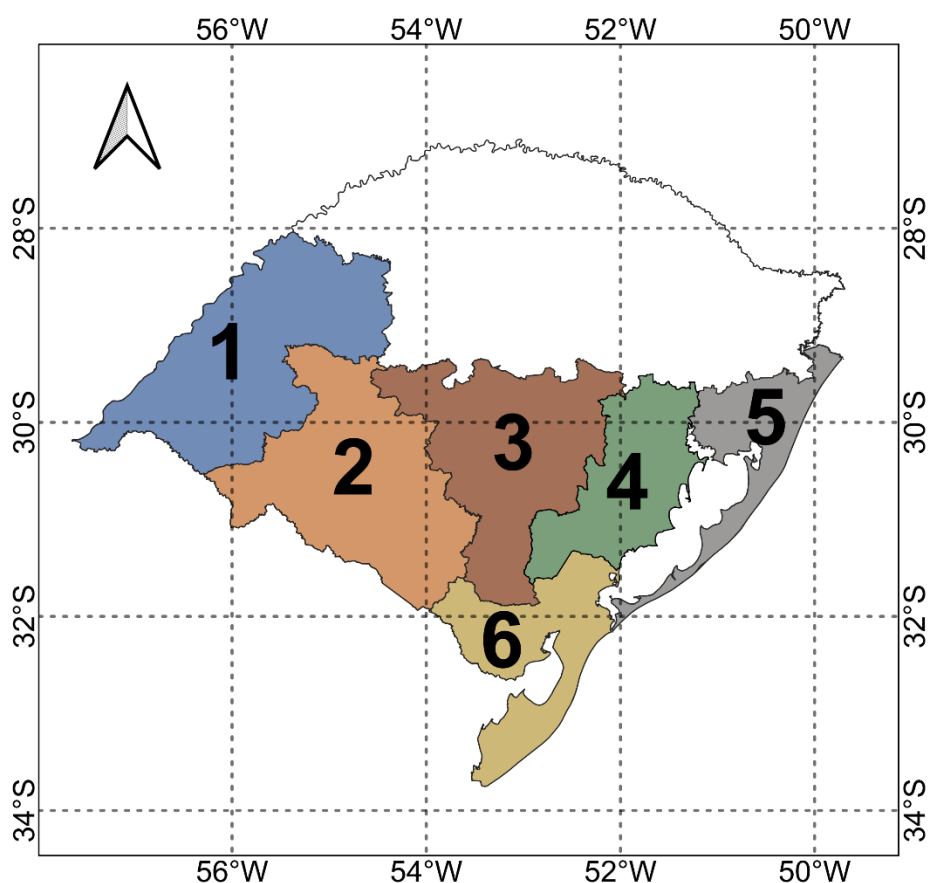


Figura 1. Metade do sul do Rio Grande do Sul e sua subdivisão nas regiões orizícolas estabelecidas pelo IRGA: Fronteira Oeste (1), Campanha (2), Região Central (3), Planície Costeira Interna (4), Planície Costeira Externa (5) e Zona Sul (6).

Nas últimas cinco safras (2016/17 a 2020/21), a produtividade média do RS foi de 8,1 Mg ha⁻¹ (IRGA, 2021). Mesmo com aumento de produtividade, a área cultivada com arroz vem reduzindo a cada safra, principalmente pela inserção da soja (*Glycine max* [L. Merrill] nas áreas de várzea. A rotação com

uma leguminosa agrega benefícios para o sistema, incrementando a produtividade de arroz em até 26% (Ribas et al., 2021).

2.2 RADIAÇÃO SOLAR: RELAÇÃO COM O POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE DE ARROZ

A radiação solar é o combustível para o processo de fotossíntese, em que as plantas sintetizam carboidratos e liberam oxigênio a partir de dióxido de carbono e água ($6 \text{ CO}_2 + 6 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6 \text{ O}_2$). A energia armazenada nessas moléculas pode ser utilizada mais tarde para impulsionar processos celulares para o crescimento e o desenvolvimento das plantas (Taiz & Zeiger, 2017). A quantidade de energia luminosa convertida em energia química está relacionada à produção de biomassa (fotoassimilados) pelas plantas (Peng et al., 2004). Este processo depende da porcentagem de interceptação e da eficiência do uso da radiação solar (Taiz & Zeiger, 2017; Heinemann et al., 2006), considerando que apenas 50% da radiação solar incidente é considerada como fotossinteticamente ativa (PAR, *Photosynthetically Active Radiation*) (Monteith, 1972; Yoshida, 1981). Os fotoassimilados produzidos na fotossíntese serão particionados para os diferentes órgãos da planta durante seu ciclo de desenvolvimento. Condições de estresse de restrição de radiação solar irão interferir nesse processo, reduzindo o potencial de produtividade da cultura.

O potencial de produtividade é considerado como a produtividade de uma cultivar (genética) que se desenvolve sem limitações de nutrientes, água e estresses bióticos (Evans, 1993; Van Ittersum & Rabbinge, 1997). Para o arroz, a disponibilidade de radiação solar define o potencial de produtividade pois a água permanece na lavoura durante a maior parte do desenvolvimento, não sendo um fator limitante (Stansel, 1975; Yoshida & Parao, 1976). O RS apresenta o maior potencial de produtividade do mundo ($14,8 \text{ Mg ha}^{-1}$), porém a produtividade média alcançada pelos produtores de arroz é de $7,7 \text{ Mg ha}^{-1}$ (Ribas et al, 2020; Yuan et al, 2021). Isso indica que existe uma lacuna de produtividade de 48% que pode ser reduzida através do ajuste de práticas de manejo (Ribas et al., 2021; Junior et al., 2021).

A principal estratégia de manejo relacionada ao aproveitamento da radiação solar é a época de semeadura (Junior et al., 2021). No RS, o período recomendado para a semeadura vai de setembro até metade de dezembro.

Semeaduras que ocorrem no início do período recomendado são associadas com maior potencial produtivo de arroz por dois principais motivos: o prolongamento da fase vegetativa e a simultaneidade das fases reprodutiva e de enchimento de grãos em dezembro e janeiro, momento de maior disponibilidade de radiação solar no RS (média de $23 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-2}$) (Ribas et al., 2016; Rosa et al., 2015; Steinmetz et al., 2013; Streck et al., 2006).

A transição do período de inverno para a primavera que ocorre em setembro tem como característica menores temperaturas do ar e do solo, tornando os processos metabólicos das plantas mais lentos e ocasionando maior duração da fase vegetativa (Yoshida & Parao, 1976). Com mais tempo para produção de folhas e perfilhos, existe maior interceptação de radiação solar devido ao aumento de Índice de Área Foliar (IAF) e, conseqüentemente, maior produção de fotoassimilados.

Além disso, a influência da radiação solar no potencial de produtividade do arroz pode ser analisada por fase de desenvolvimento. A demanda por radiação solar varia conforme a fase da cultura, interferindo na definição dos componentes de rendimento (Yoshida, 1981). Durante a fase vegetativa, a restrição de radiação solar reduz o perfilhamento, diminuindo a produção de matéria seca. Na fase reprodutiva, o número de espiguetas por panícula é definido e o déficit de radiação solar interfere na quantidade de drenos reprodutivos (Liu et al., 2014). Durante o enchimento de grãos, a restrição de radiação solar é responsável pelo aumento do número de grãos vazios por panícula e o peso dos grãos é mais baixo (Wang et al., 2013). Dessa forma, o potencial de produtividade do arroz será construído baseado na fase e na intensidade em que ocorre a restrição de radiação solar.

2.3 MUDANÇA CLIMÁTICA

A concentração dos gases de efeito estufa, como dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O) está aumentando desde o período que precede a revolução industrial (Walter et al., 2010). Esse incremento é a principal causa da mudança climática e está relacionado com as emissões antrópicas pelo uso de combustível fóssil como fonte de energia e pelo uso indevido da terra (IPCC, 2013). As alterações das concentrações desses gases na atmosfera intensificam o efeito estufa, um processo natural e fundamental

para a manutenção da temperatura do planeta. Durante este processo, parte da radiação de ondas longas emitida pela superfície é absorvida pelas moléculas dos gases de efeito estufa, sendo reemitida para a superfície (Walter et al., 2010).

Para as culturas agrícolas (principalmente as plantas C3), o incremento de CO₂ na atmosfera ocasionaria aumento da taxa de crescimento e da produtividade, pois o CO₂ é considerado o substrato para o processo de fotossíntese (Taiz & Zeiger, 2017). Porém, quando o aumento da concentração de CO₂ é acompanhado pelo aumento da temperatura (Streck & Alberto, 2006) e da redução da disponibilidade de radiação solar, a produtividade das culturas como o arroz irrigado é negativamente afetada.

A temperatura média global da superfície foi estimada por uma tendência linear de aumento de $0,74\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,18\text{ }^{\circ}\text{C}$ nos últimos 100 anos (IPCC, 2007; Deng et al., 2015). Foi observado que o incremento nas temperaturas mínimas em relação às temperaturas máximas aproximadamente 3 vezes maior no período de 1979 até 2003. A relação negativa desse aumento com a produção de biomassa do arroz é 10% menor para cada 1°C de aumento na temperatura noturna (Peng et al., 2004). Este processo interfere na produtividade de arroz pelo aumento da taxa de respiração noturna e, conseqüentemente, consumo de biomassa (Tao et al., 2008). Além disso, eventos de temperatura extrema durante a floração são responsáveis pelo aumento da esterilidade de espiguetas, reduzindo o potencial produtivo da cultura (Yoshida, 1976).

Do mesmo modo, a maior concentração de gases de efeito estufa e de vapor de água na atmosfera está associada à diminuição de radiação solar (Deng et al., 2015). O declínio da radiação solar foi quantificado em 2,7% por década nos últimos 50 anos (Stanhill & Cohen, 2001) e deve continuar devido ao aumento de dias nublados e dispersão de radiação causada por aerossóis (Walthall et al., 2013). Na Ásia, por exemplo, a poluição atmosférica causada pela alta atividade industrial é responsável pelo “escurecimento solar”, pelo menos, desde 1960 em algumas províncias. Isso implica na redução da radiação solar incidente e aumenta a radiação solar difusa (Deng et al., 2015; Shao et al., 2021; Shuai et al., 2013). O efeito do escurecimento solar no arroz interfere na relação entre fonte/dreno principalmente após o florescimento, reduzindo o tamanho dos grãos (Shao et al., 2021).

Futuros cenários de mudança climática foram projetados por alguns autores para conhecer seus impactos sobre a cultura do arroz irrigado (Abeyasingha et al., 2016; Van Oort, 2017; Yao et al, 2007). No RS, ao simularem o cenário A1B do quarto relatório do Painel Intergovernamental de Mudança Climática (IPCC) com o modelo SimulArroz, Walter et al. (2014) observaram elevação constante da concentração de CO₂ na atmosfera, com valores próximos a 700 ppm até o final do século XXI. Do mesmo modo, observaram acréscimo de até 3,7°C e 2,9°C nas temperaturas mínimas e máximas em algumas regiões orizícolas, respectivamente. Para a radiação solar, houve uma pequena tendência de redução ao longo dos anos. A alteração nessas características indicou uma tendência de aumento de produtividade de arroz na maior parte da região orizícola, principalmente na Zona Sul, e indicam que existe possibilidade da antecipação da semeadura para o mês de agosto no final do século XXI.

Na prática, mitigar os efeitos da mudança climática nas lavouras de arroz passa pela adaptação das práticas culturais e de manejo. A utilização de cultivares de maior resistência à altas temperaturas durante o florescimento, com maior tolerância à baixos níveis de radiação solar e a antecipação da época de semeadura são estratégias importante para contornar o incremento nas temperaturas e na redução de disponibilidade de radiação solar (Walter et al., 2010; Shao et al., 2020).

2.4 O FENÔMENO EL NIÑO – OSCILAÇÃO SUL (ENOS)

O fenômeno El Niño – Oscilação Sul (ENOS) é uma interação natural entre a atmosfera e o oceano, resultante de anomalias de temperatura das águas superficiais do Oceano Pacífico Equatorial (TSM). O ENOS ocorre em uma fase neutra e em duas fases de anomalias, denominadas de La Niña (ou fase fria) e El Niño (ou fase quente) (Fedorov & Philander, 2000; Grimm, 2003; Matzenauer et al., 2017).

A La Niña é caracterizada pelo resfriamento anormal das águas da superfície do Oceano Pacífico junto à costa da América do Sul, ocasionado pela maior velocidade dos ventos alísios (Gelcer et al., 2013). Já o El Niño resulta do aquecimento anormal das águas superficiais do Oceano Pacífico junto a costa da América do Sul, ocasionado pela menor velocidade dos ventos alísios. Não

apenas as temperaturas da superfície do mar mudam, mas o clima ao redor do mundo também é alterado como resultado dessa interação oceano-atmosfera, o que interfere na produção de grãos (Barrios-Perez et al., 2021; Hebert & Dixon, 2002; Heinemann et al., 2021; Naylor et al., 2001; Reyes & David, 2009; Roberts et al., 2009; Zubair, 2002;).

No Brasil, os eventos afetam a região tropical e a região subtropical de maneira distinta. O efeito do El Niño nas Regiões Norte e Nordeste do país é responsável por períodos de estiagem mais prolongados. O Centro-Oeste é classificada como uma região de transição (Júnior & Sentelhas, 2019a), enquanto nas Regiões Sul e Sudeste existe maior probabilidade de inundações. Na fase La Niña, a situação se inverte (Heinemann et al., 2019).

No RS, os impactos do ENOS estão relacionados à produção de arroz pois implicam no regime hídrico e na disponibilidade de radiação solar para a cultura (Berlato & Fontana, 2001; Cunha, 1999; Matzenauer et al., 2017). Em um ano de El Niño, a produtividade de arroz irrigado apresenta menores potenciais de produtividade pois o evento ocasiona precipitações acima da média normal climatológica (Berlato & Fontana, 2001; Cunha, 1999; Meus et al., 2020). Nesse sentido, o El Niño interfere em duas ocasiões: mais chuvas durante a primavera no RS são responsáveis pelo atraso da semeadura e as fases reprodutiva e de enchimento de grãos do arroz não coincidem com o período de maior disponibilidade de radiação solar (Junior et al., 2021). Analisando a evolução da semeadura, apenas em anos de La Niña foi possível semear 50% da área na primeira quinzena de outubro (Meus et al., 2020; Nascimento, 2019).

Por outro lado, Carmona & Berlato (2001) analisaram uma série histórica de 55 anos (1945-2000) e observaram que, de 17 anos de ocorrência de El Niño, 9 foram desfavoráveis (53%) à produtividade do arroz e 8 foram favoráveis (43%). Isso indica que a intensidade do fenômeno deve ser levada em consideração e que nem todos os anos de El Niño devem ser associados com menores produtividades de arroz.

**3 ARTIGO – QUANTO O ARROZ DEIXA DE PRODUZIR POR DIA
NUBLADO EM AMBIENTE SUBTROPICAL?**

(Será submetido para a revista Agronomy Journal)

Quanto o arroz deixa de produzir por dia nublado em ambiente subtropical?

Ioran Guedes Rossato⁽¹⁾, Nereu Augusto Streck⁽¹⁾, Alexandre Bryan Heinemann⁽⁴⁾, Cleber Maus Alberto⁽²⁾, Michel Rocha da Silva⁽¹⁾, Anderson Haas Poersch⁽¹⁾, Lorenzo Dalcin Meus⁽¹⁾, Fernando Fumagalli Miranda⁽³⁾, Alencar Junior Zanon⁽¹⁾.

⁽¹⁾Universidade Federal de Santa Maria, Departamento de Fitotecnia, Prédio 77, Avenida 8 Roraima, nº 1000, CEP 97105-900, Santa Maria, RS, Brasil.

⁽²⁾Universidade Federal do Pampa, Rua Luiz Joaquim de Sá Brito, s/n, CEP 97650-000, Itaqui, RS, Brasil.

⁽³⁾Instituto Rio Grandense do Arroz, Estação Experimental do Arroz, Avenida Bonifácio Carvalho Bernardes, nº 1494, CEP 94930-30, Cachoeirinha, RS, Brasil.

⁽⁴⁾ Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Rodovia GO-462, Km 12, Fazenda Capivara, Zona Rural, CEP: 75375-000, Santo Antônio de Goiás, GO, Brasil.

E-mail: ioranrossato@gmail.com; nstreck2@yahoo.com.br; michelrs@live.com; cleberalberto@unipampa.edu.br; andersonhpo@hotmail.com; lorenzo_meus@hotmail.com; fernando-miranda@irga.rs.gov.br; alencarzanon@hotmail.com; alexandre.heinemann@embrapa.br

Abstract – Rice (*Oryza sativa* L.) yield potential is defined by the availability of solar radiation during the growing season. The reduction of solar radiation pointed out by future climate change scenarios and in “El Niño” years in Southern Brazil can reduce crop yield. The objectives of this study are to indicate at which development phase the productivity is most penalized as a result of solar radiation restriction, and to estimate how much the crop fails to produce on a cloudy day at each development phase. Were used screens with 24%, 36% and 43% restriction intensity of incident solar radiation at vegetative, reproductive and grain filling phases in 2017/18 e 2018/19 crop season in Rio Grande do Sul, Brazil. We identified that the yield penalty as a consequence of solar radiation restriction is more intense during grain filling (138 kg ha⁻¹dia⁻¹), followed by the reproductive phase (124 kg ha⁻¹dia⁻¹) and vegetative phase (24 kg ha⁻¹dia⁻¹). These results are important to optimize the sowing date management and to direct genetic improvement programs in the search for more efficient cultivars in the solar radiation use.

Index terms: *Oryza sativa* (L); solar radiation restriction; shading; yield.

Quanto o arroz deixa de produzir por dia nublado em ambiente subtropical?

Resumo – O potencial de produtividade de arroz (*Oryza sativa* L.) é definido pela disponibilidade de radiação solar durante o ciclo de desenvolvimento. A redução de radiação solar devido as mudanças climáticas e em anos de El Niño no Sul do Brasil pode reduzir a produtividade do arroz. Os objetivos deste estudo são: 1) determinar a fase do desenvolvimento em que a restrição de radiação solar mais afeta a produtividade de grãos e 2) quantificar o efeito de um dia nublado na produtividade de grãos nas fases vegetativa, reprodutiva e enchimento de grãos. Para isso, foram utilizadas telas com 24%, 36% e 43% de restrição da radiação solar incidente nas fases vegetativa, reprodutiva e de enchimento de grãos, além de um tratamento testemunha com radiação solar ambiente. Os experimentos foram conduzidos em 4 locais (Cachoeirinha, Santa Maria, Agudo e Itaqui) nas safras 2017/18 e 2018/19 no Rio Grande do Sul, Brasil. A produtividade de grãos do arroz irrigado teve a maior penalização devido a restrição de radiação solar na fase de enchimento de grãos ($142 \text{ kg ha}^{-1}\text{dia}^{-1}$), seguido da fase reprodutiva ($126 \text{ kg ha}^{-1}\text{dia}^{-1}$) e vegetativa ($28 \text{ kg ha}^{-1}\text{dia}^{-1}$). Estes resultados são importantes pois permitem otimizar a época de semeadura, orientar o manejo de fertilizantes em função da previsão climática e direcionar os programas de melhoramento genético na busca de cultivares mais eficientes no uso da radiação solar.

Palavras-chave: *Oryza sativa* (L); restrição de radiação solar; potencial de produtividade; desenvolvimento.

INTRODUÇÃO

O arroz (*Oryza sativa* L.) fornece 21% das calorias da dieta alimentar de 3 bilhões de pessoas (Faostat, 2021). Fora do continente asiático, o Brasil é o maior produtor mundial, sendo o Rio Grande do Sul (RS) responsável por 73% da produção brasileira em 1 milhão de hectares (CONAB, 2021). O RS apresenta potencial de produtividade (Y_p) de $14,8 \text{ Mg ha}^{-1}$ e a produtividade média alcançada pelos produtores de arroz é de $7,7 \text{ Mg ha}^{-1}$, indicando a existência de uma lacuna de produtividade de 48% que pode ser reduzida através de ajustes das práticas de manejo (Ribas et al., 2021; Duarte Junior et al., 2021; Yuan et al., 2021).

O Y_p indica a produtividade de uma cultivar quando não há limitações de nutrientes, estresses bióticos e água para seu desenvolvimento (Evans, 1993; Van Ittersum & Rabbinge, 1997). A região subtropical do Brasil apresenta um dos maiores Y_p de arroz do mundo em relação às regiões tropicais e temperadas (Yuan et al., 2021) devido a maior disponibilidade de radiação solar durante a estação de crescimento (Duarte Junior et al., 2021; Heinemann et al., 2019) e ao menor risco de danos por baixas temperaturas, respectivamente (Espe et al., 2016).

Estudos com restrição de radiação solar em arroz têm aumentado nas últimas décadas, pois esse é considerado um dos principais fatores que provoca a lacuna de produtividade das lavouras no mundo (Deng et al., 2021; Ishimaru et al., 2016; Li et al., 2020; Liu et al., 2014; Wang et al., 2015; Yang et al., 2019). Diversos trabalhos associam a tendência de redução da radiação solar projetada pelos cenários futuros referentes as mudanças climáticas com a redução da produtividade de arroz (Alridiwirsah et al., 2018; Chen et al., 2019; Deng et al., 2015; Dutta et al., 2019; Kobata et al., 2017; Tsukaguchi et al., 2018; Wu et al., 2017; Yoshida, 1981; Yoshida & Parao, 1976). No Sul do Brasil, os trabalhos estão associados ao impacto do fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENOS), que ocasiona precipitações acima da média normal climatológica em sua fase quente (El Niño), reduzindo a disponibilidade de radiação solar (Arsego et al., 2020; De Freitas et al., 2020; Custodio, 2015; Klering et al., 2016; Júnior & Sentelhas, 2019b;) e conseqüentemente adiando a data de semeadura (Duarte Junior et al., 2021; Ribas et al., 2021). Porém, nenhum destes estudos quantificou a perda de

produtividade por dia nublado nas fases de desenvolvimento do arroz irrigado, o que é fundamental para que produtores de arroz ajustem o manejo, afim de mitigar os efeitos da mudança climática e dos anos de El Niño no Sul do Brasil. Além disso, direciona os programas de melhoramento genético para o desenvolvimento de cultivares tolerantes ao sombreamento e mais eficientes no uso da radiação solar.

A hipótese deste estudo considera a fase de enchimento de grãos do arroz irrigado como mais sensível à restrição de radiação solar, pois a perda de produtividade por dia nublado é mais intensa nesse período. Os objetivos são: 1) determinar em que fase do desenvolvimento a produtividade sofre maior penalização pela restrição de radiação solar e 2) quantificar a redução de produtividade por dia nublado nas fases do desenvolvimento da cultura do arroz irrigado.

MATERIAL E MÉTODOS

Descrição da área de estudo

Setenta por cento da produção de arroz no Brasil está concentrada em um milhão de hectares distribuídos na metade sul do RS. As lavouras de arroz são irrigadas e permanecem com lâmina de água de V3-R9 (Counce et al., 2000). Os tipos de solo que permitem a inundação dessas áreas são classificados como Alfisols, Ultisols, Aqualfs e Oxisols (Streck et al., 2008). De acordo com a classificação de Köppen, o clima é classificado como subtropical úmido (Cfa). As condições de temperatura aumentam do Sul para o Norte no RS, já a incidência de radiação solar aumenta de Leste para Oeste (Ribas et al., 2021). Durante a estação de crescimento da lavoura de arroz, a média mensal de radiação solar varia de 13 a 25 MJ m⁻²dia⁻¹, sendo dezembro o mês com maior incidência. O potencial de produtividade é maior quando a semeadura é antecipada (setembro/início de outubro), pois as fases reprodutiva e de enchimento de grãos coincidem com o período de maior incidência de radiação solar (Duarte Junior et al, 2021).

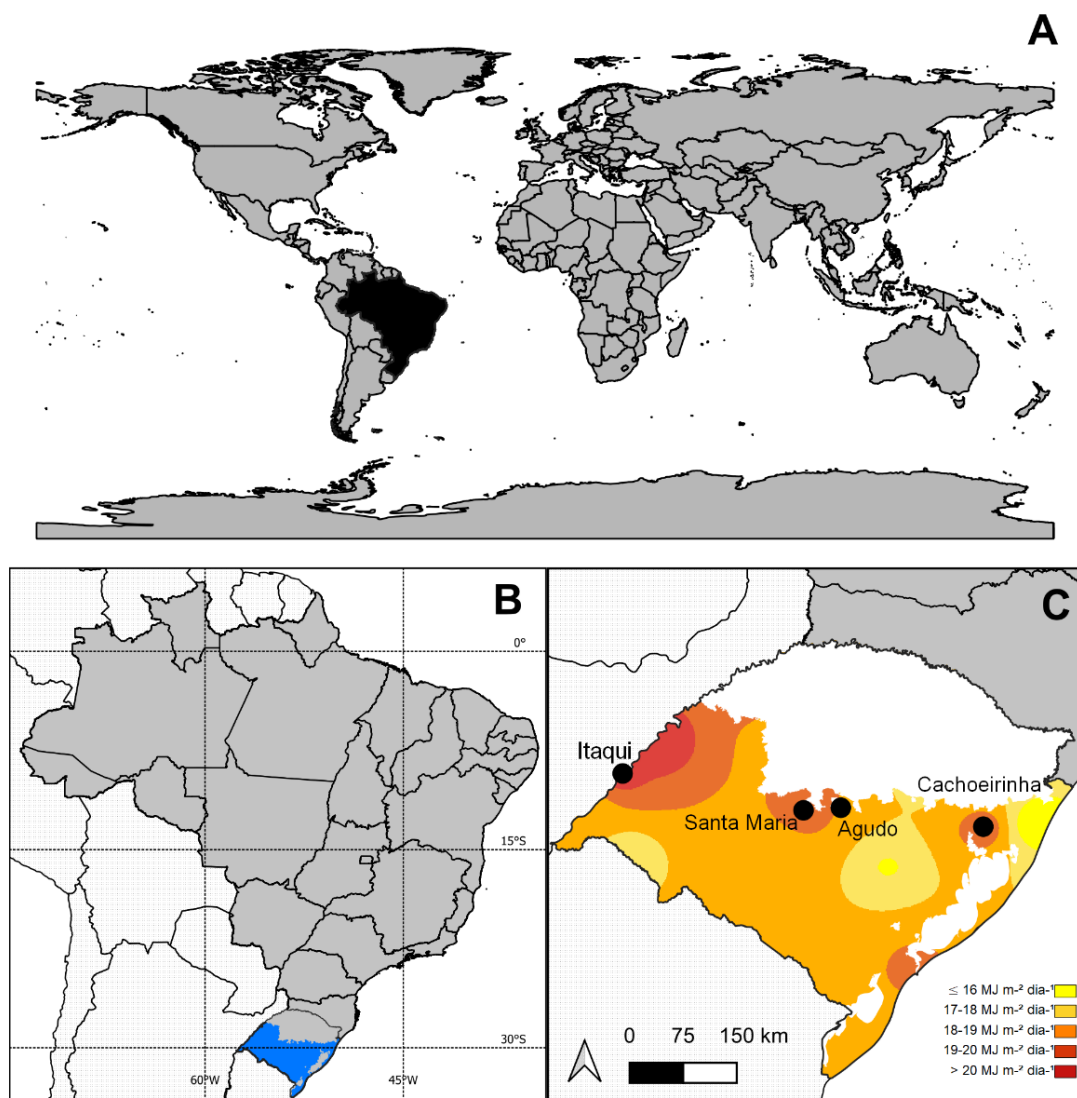


Figura 1. (A) Panorama global e destaque para o Brasil, preenchido em preto. (B) Metade sul do RS inserida no cenário brasileiro, em azul. (C) Incidência de radiação solar na metade sul do RS durante a estação de crescimento do arroz irrigado (médias do período setembro-abril). Os pontos pretos indicam os locais de realização dos experimentos durante as estações de crescimento 2017/18 e 2018/19.

Experimentos de campo

Os experimentos de campo foram conduzidos durante os anos agrícolas 2017/18 e 2018/19 em Cachoeirinha (29°56'S;51°07'O), Santa Maria (29°43'S; 53°36'O), Agudo (29°39'S; 53°16'O) e Itaqui (29°09'S; 56°33'O) no RS, representando a variabilidade de disponibilidade de radiação solar no RS ao longo da estação de crescimento da lavoura de arroz irrigado (Tabela 1). O

delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso, com quatro repetições em parcelas de 18m². A cultivar IRGA 424 RI foi utilizada nos dois anos, com espaçamento de 0.17m e densidade de semeadura de 90 kg ha⁻¹ de semente. Os experimentos foram instalados na direção Leste-Oeste para evitar a incidência lateral de radiação solar. Os tratamentos foram compostos por níveis de restrição de radiação solar de 24%, 36% e 43% gerados por telas de malha preta durante as fases vegetativa (V1-R1), reprodutiva (R1-R4) e de enchimento de grãos (R4-R9) (Counce et al., 2000), além de uma testemunha que recebeu 100% da radiação solar durante todo ciclo. A transmitância das telas de sombreamento foi mensurada com o aparelho LCI-SD (ADC BioScientific®). O nível de restrição solar de 36% não foi utilizado na safra 2018/19 devido a não disponibilidade de tela no mercado. As telas foram instaladas a uma altura de 0,5m acima do dossel e possuíam largura necessária para evitar a entrada de radiação solar pelas laterais das parcelas. A adubação foi realizada de acordo com análise de solo para obtenção de produtividades de 15 Mg ha⁻¹. A adubação nitrogenada foi fracionada em 90 kg ha⁻¹ de Nitrogênio aplicados em V3 e 45 kg ha⁻¹ de Nitrogênio aplicados em R1. O início da irrigação aconteceu imediatamente após a primeira aplicação de ureia. O controle de plantas daninhas, doenças e insetos foi realizado visando evitar estresses às plantas.

Tabela 1. Experimentos com restrição de radiação solar sobre a cultura do arroz conduzidos durante duas estações de crescimento (2017/18 e 2018/19) em quatro locais do Rio Grande do Sul, Brasil.

Local	Coordenadas	Data de semeadura	Tipo de solo	Duração do ciclo (dias)	Radiação solar ¹ (MJ m ⁻² dia ⁻¹)	Coefficiente Fototérmico ² (MJ m ⁻² dia ⁻¹ °C)	Produtividade ³ (Mg ha ⁻¹)
Estação de crescimento 2017/18							
Cachoeirinha	29°56'S 51°07'O	25/10/2017	Aqualf	136	22,5	1,62	12,9 (11,9-13,5)
Santa Maria	29°43'S 53°36'O	02/11/2017	Alfisol	132	21,6	1,91	13,6 (11,8-15)
Itaqui	29°09'S 56°33'O	31/10/2017	Oxisol	141	23,1	1,73	11,7 (11,3-11,2)
Estação de crescimento 2018/19							
Cachoeirinha	29°56'S 51°07'O	24/10/2018	Aqualf	129	22,6	1,68	9,9 (8,2-10)
Agudo	29°39'S 53°16'O	08/10/2018	Alfisol	122	22,6	1,64	9,1 (7,7-10,2)
Itaqui	29°09'S 56°33'O	02/11/2018	Oxisol	125	21,1	1,52	8,3 (7,6-8,8)

¹Média de radiação solar durante toda estação de crescimento; ²Coefficiente Fototérmico nos tratamentos sem restrição de radiação solar; ³Produtividade média (e variação da produtividade) nos tratamentos sem restrição de radiação solar.

Dados meteorológicos e avaliações de campo

Foram utilizados dados meteorológicos de radiação solar (RadSol, em MJ m⁻² dia⁻¹), temperatura máxima e mínima do ar (Tmax e Tmin, em °C, respectivamente) e precipitação (Prec, em mm) das estações automáticas instaladas na lavoura a menos de 5 km dos experimentos (Cachoeirinha e Itaqui) e de estações automáticas Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizadas a 15 Km (Santa Maria) e 50 Km (Agudo) dos experimentos (Figura 2).

O número de plantas (NPm²), colmos (NCm²) e panículas por metro quadrado (Npanm²) foi quantificado em 1m em cada parcela. A coleta de plantas nos estágios V3, R1, R4 e R9 foi realizada em 2m em cada parcela. As plantas foram separadas nos compartimentos folhas, colmos, folhas senescidas e panículas, levadas para estufa a 60°C e pesadas em balança de precisão. Foram realizadas análises do número de espiguetas por panícula (NEP) e o peso de mil grãos (PMG) em 15 panículas por parcela. Nessa análise foram quantificados o número de espiguetas cheias (NEC) e o número de espiguetas vazias (NEV). Para análise de produtividade (13% de umidade), foram colhidos 5m² por parcela.

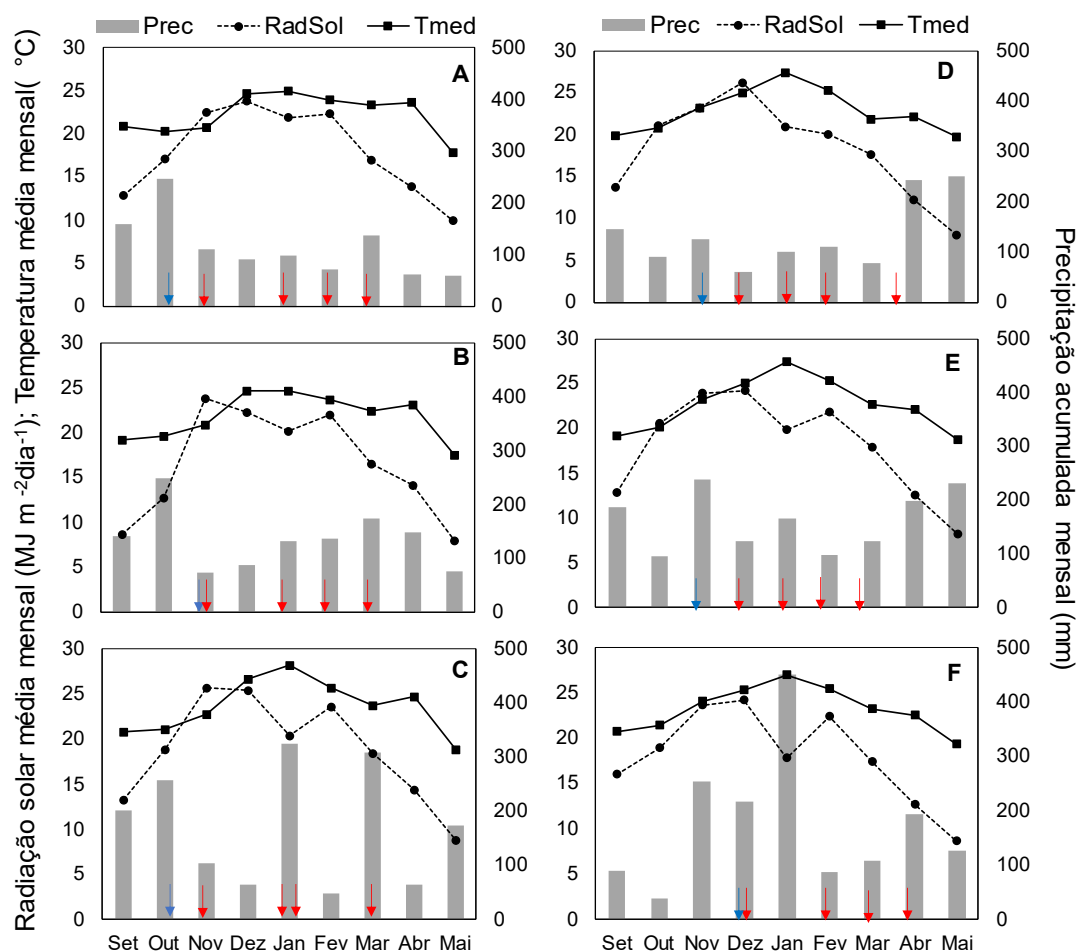


Figura 2. Radiação solar média mensal (RadSol, em MJ m⁻²dia⁻¹), Temperatura média mensal (Tmed, em °C) e Precipitação acumulada mensal (Prec, em mm) durante as estações de crescimento 2017/2018 em Cachoeirinha (A), Santa Maria (B) e Itaqui (C) e 2018/2019 em Cachoeirinha (D), Agudo (E) e Itaqui (F). As curvas de RadSol (pontilhada) e Tmed (contínua) estão relacionadas com o eixo y da esquerda, enquanto as colunas que indicam a Prec estão relacionadas com o eixo y secundário da direita. As setas azuis indicam a sementeira e as setas vermelhas indicam, respectivamente, os estádios de desenvolvimento V1, R1, R4 e R9 durante as estações de crescimento.

Definição de um dia nublado

Para estabelecer a quantidade de radiação solar disponível em um dia nublado, foram utilizados os dados meteorológicos médios diários de Tmax, Tmin, Prec e RadSol. A amplitude térmica diária (ATD) foi calculada através da diferença entre Tmax e Tmin para cada local durante as estações de crescimento. Foram selecionados os dias com menor ATD (10% dos menores

valores obtidos), confrontando-os com os dados de RadSol. Os dados de Prec foram utilizados para “validar” esta informação. Observou-se que menores valores de RadSol ocorreram em dias com menor ATD e, na maioria das vezes, esses dias foram chuvosos. A porcentagem de redução de RadSol por conta da cobertura de nuvens variou de 47% a 60,5%, indicando variabilidade entre locais e anos. Na média dos dois anos, foi estimado que até 55,3% de RadSol é reduzida, o que correspondeu a $9,93 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ (Tabela 2).

Tabela 2. Estimativa de radiação solar disponível em um dia nublado e porcentagem da redução de RadSol em ambiente subtropical durante as estações de crescimento 2017/18 e 2018/19.

Safra	Local	RadSol média da safra ¹ ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$)	RadSol média em um dia nublado ² ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$)	Redução de RadSol (%)
2017/18	Cachoeirinha	22,5	11,7	47,7
	Santa Maria	21,6	10,2	52,9
	Itaqui	23,1	9,8	57,7
2018/19	Cachoeirinha	22,6	10,5	53,4
	Agudo	22,6	8,9	60,5
	Itaqui	21,1	8,5	59,8
	Média	22,2	9,93	55,3

¹A RadSol média da safra foi contabilizada a partir da semeadura até a data da colheita.

²A RadSol média em um dia nublado corresponde à média de RadSol nos dias das menores ATD.

Perda de produtividade por dia nublado

Foram utilizadas regressões lineares entre a produtividade e a radiação solar incidente. O coeficiente angular das regressões lineares indicou a produtividade por unidade de radiação solar incidente (Kg MJ^{-1}). Foi realizada a média de duração das fases de desenvolvimento entre locais e estações de crescimento nas fases vegetativa (47 dias), reprodutiva (31 dias) e de enchimento de grãos (34 dias). A relação entre o coeficiente angular e a duração da fase indicou a produtividade média diária por fase ($\text{kg ha}^{-1} \text{ MJ dia}^{-1}$). A média de radiação solar incidente entre as estações de crescimento e locais nas fases vegetativa ($23,8 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) reprodutiva ($20,8 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e de enchimento de grãos ($21,3 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) foi usada para determinar a produtividade em um dia límpido. O produto entre produtividade média diária por fase e a quantidade de

radiação solar média por fase indicou a produtividade em um dia límpido. O produto entre a produtividade média diária por fase e a quantidade de radiação solar média em um dia nublado (9,93 MJ m⁻²dia⁻¹) indicou a produtividade em um dia nublado. A diferença indica a perda de produtividade em um dia nublado por fase de desenvolvimento.

Coeficiente Fototérmico

O Coeficiente Fototérmico (Q) foi calculado através dos dados obtidos das estações meteorológicas (Equação 1). Foi considerada a média de radiação solar para o durante as fases de desenvolvimento, sendo descontado a porcentagem de radiação solar restringida pelas telas nos tratamentos sombreados. A temperatura ambiente foi mensurada e observou-se que não houve diferença no interior e no exterior das telas, utilizando-se então os dados de temperatura obtidos nas estações meteorológicas. A temperatura basal inferior (T_b) utilizada para quantificar o Q foi setada em 10°C, com base na metodologia utilizada por Islam & Morison (1992).

$$Q = \frac{\text{Radiação solar média}}{(\text{Temperatura média} - 10^{\circ}\text{C})} \quad (1)$$

Análises estatísticas

Os dados para as duas estações de crescimento foram analisados por meio de Análise de Variância (ANOVA). As médias entre os tratamentos foram comparadas através do Teste t (*Least Significant Difference Test* – LSD), com probabilidade de erro de 1%. As relações entre radiação solar incidente e coeficiente fototérmico com a produtividade foram analisadas através de análises de regressão, com 1% de probabilidade de erro. Para realizar a estatística, foi utilizado o software SISVAR v5.7®. As figuras foram elaboradas com o software Microsoft Excel®.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Produtividade de grãos, componentes de rendimento e perda de produtividade por dia nublado

A produtividade média entre as estações de crescimento foi maior em 2017/18 (12,7 Mg ha⁻¹) do que em 2018/19 (9,1 Mg ha⁻¹) (Tabela 3). Essa

tendência também foi observada nas lavouras do RS, em que a média de produtividade foi de 8 Mg ha⁻¹ (2017/18) e 7,5 Mg ha⁻¹ (2018/19). A maior ocorrência de precipitação em setembro e outubro de 2017 resultou no adiamento da semeadura e redução do potencial produtivo. Apenas na primeira quinzena de novembro o RS atingiu 50% das lavouras semeadas no ano agrícola 2017/18, enquanto mais de 79% das lavouras já haviam sido semeadas no mesmo período em 2018/19 (IRGA, 2020). Porém, o maior número de dias límpidos durante as fases de enchimento de grãos e reprodutiva reduziu este impacto (Junior & Sentelhas, 2019b) (Figura 2). Em 2019, maiores acumulados de chuvas de janeiro até o final da estação de crescimento reduziram a radiação solar e a taxa fotossintética foi penalizada. Assim, a menor capacidade de dreno pelas plantas resultou em menor produtividade (Deng et al., 2009; Liu et al., 2020).

Tabela 3. Produtividade entre os níveis de radiação solar e fases de desenvolvimento durante as estações de crescimento 2017/18 e 2018/19 em ambiente subtropical. Letras diferentes indicam diferença significativa entre os tratamentos de acordo com o Teste t (LSD) a 1% de probabilidade de erro.

Safr	Fase sombreada	Produtividade (Mg ha ⁻¹)			
		0% ¹	24%	36%	43%
2017/18	V1-R1		11,3ab	-	-
	R1-R4	12,7a	11b	9,1c	8,0cd
	R4-R9		10,3bc	8,5cd	7,6d
Média geral (Mg ha ⁻¹)		9,8			
CV (%)		6,4			
2018/19	V1-R1		9,1a	-	-
	R1-R4	9,1a	8,5ab	-	7,0bc
	R4-R9		8,1ab	-	6,4c
Média geral (Mg ha ⁻¹)		8,2			
CV (%)		9,45			

¹Sem restrição de radiação solar durante todo o ciclo de desenvolvimento da cultura.

A produtividade variou entre 6,4 e 12,7 Mg ha⁻¹, com perdas ocasionadas pela redução de radiação solar de 40,1% e 29,1% nas estações de crescimento 2017/18 e 2018/19, respectivamente (Figura 3A). Nos experimentos em 2017/18,

o NEV foi 40% menor, o PMG 14,7% maior e NEC 3% maior do que em 2018/19, justificando a diferença de produtividade entre as estações de crescimento. Estudos recentes com restrição de radiação solar de 53% de R4-R9 na região subtropical da China indicaram que a produtividade de grãos foi reduzida em até 49,6% (2010), 47,7% (2011) e 33,4% (2012), principalmente devido a redução do NEC em 48,4% (2010), 32,3% (2011) e 30% (2012) (Wang et al., 2015). Também na China, Li et al. (2020) identificaram uma redução na taxa de enchimento de espiguetas em 13% (2018) e 16,4% (2019) e do peso de grãos em 10% (2018) e 9,6% (2019) ao utilizarem 53% de restrição de radiação solar por 30 dias após a floração. Esses valores indicam que o enchimento de espiguetas é o principal processo afetado e que limita o potencial de produtividade nas cultivares atuais de arroz, reduzindo significativamente o NGP quando submetidas à restrição de radiação solar.

As maiores produtividades de grãos de arroz ocorreram quando não houve restrição de radiação solar, reduzindo de acordo com a intensidade e a fase do estresse de restrição de radiação solar (Figura 3B). A fase mais crítica foi o enchimento de grãos, em que a produtividade reduziu 1,7 Mg ha⁻¹, 2,4 Mg ha⁻¹ e 3,9 Mg ha⁻¹, nas intensidades de 24%, 36% e 43%, respectivamente. Na fase reprodutiva, houve redução de 1,1 Mg ha⁻¹, 1,7 Mg ha⁻¹ e 3,7 Mg ha⁻¹ nas intensidades de 24%, 36% e 43%, respectivamente. Já na fase vegetativa, a redução de produtividade foi de 0,7 Mg ha⁻¹ (Tabela 3). Os resultados obtidos nesse estudo são semelhantes aos resultados encontrados na literatura recente, em que a restrição de radiação solar reduz a produtividade do arroz, principalmente durante o enchimento de grãos (Li et al., 2020; Wang et al., 2015; Wu et al., 2017). No entanto, divergem de estudos clássicos como Yoshida & Parao (1976), que indicaram que a fase mais crítica à restrição de radiação solar ocorreu na fase reprodutiva (R1-R4), em Los Baños, Filipinas.

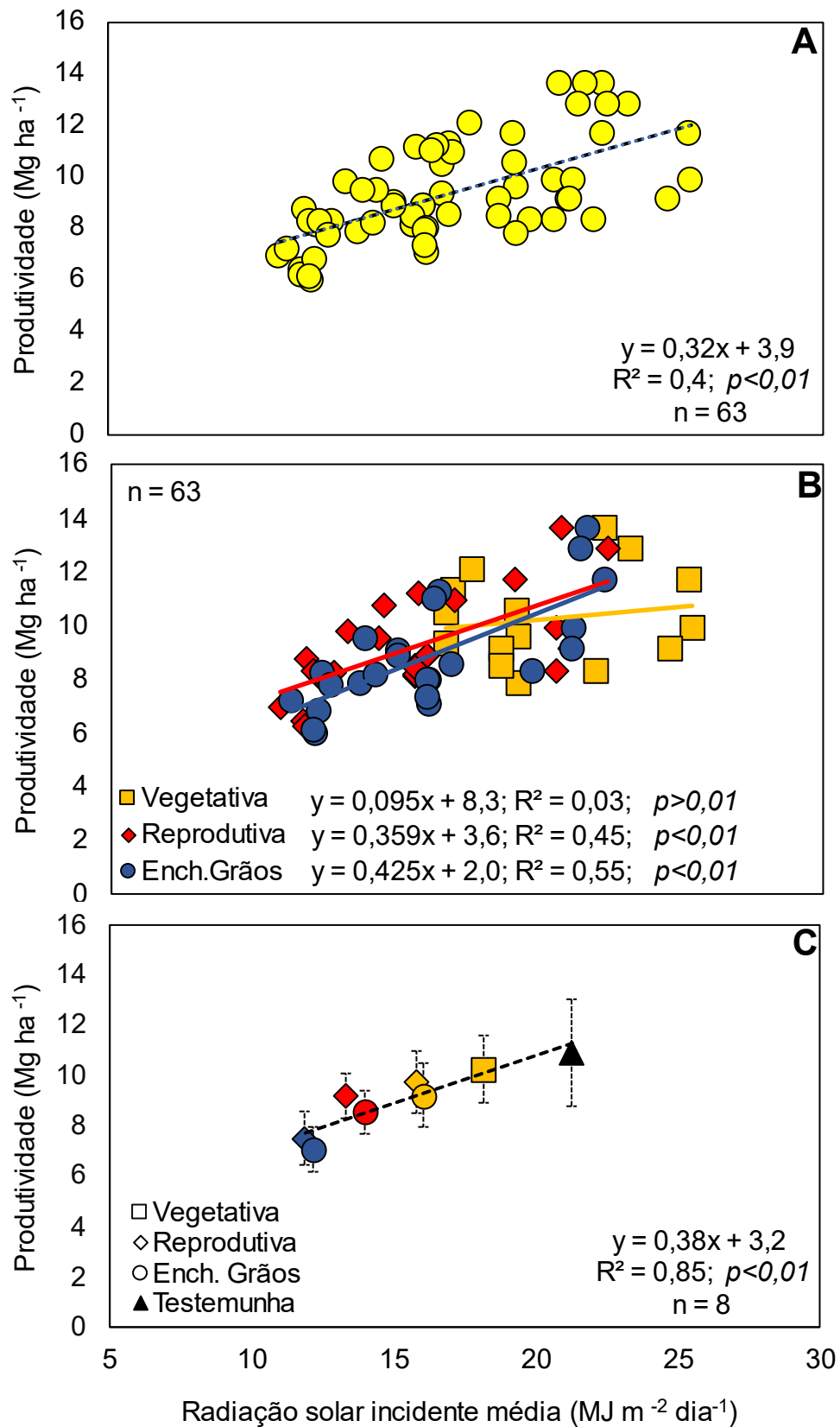


Figura 3. (A) Produtividade de grãos e Radiação solar incidente média durante as estações de crescimento 2017/18 e 2018/19 em ambiente subtropical; (B) Produtividade de grãos e Radiação solar incidente média por fase de

desenvolvimento durante as estações de crescimento 2017/18 e 2018/19 em ambiente subtropical; (C) Produtividade média em relação a radiação solar média. Os níveis de restrição de Radiação solar incidente de 0% (testemunha, em preto), 24% (laranja), 36% (vermelho) e 43% (azul) são indicados pelas cores. A combinação entre forma e cores dos marcadores indica a fase e a intensidade que ocorreu o sombreamento, respectivamente. As barras verticais pontilhadas indicam o desvio padrão entre as médias dos tratamentos. O $p < 0,01$ indica significância a 1% de probabilidade de erro.

Analisando a relação entre a produtividade e radiação solar incidente média diária por fase de desenvolvimento (Figura 3B), as perdas de produtividade por dia nublado foram de $28 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$, $126 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ e $142 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ nas fases vegetativa, reprodutiva e de enchimento de grãos, respectivamente (Tabela 4). O coeficiente angular da regressão linear (Figura 3B) indica que a maior produtividade por unidade de radiação solar ocorre de R4-R9 ($425 \text{ kg MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$). Como o principal componente que limita a produtividade (NGP) é definido após o florescimento, é nesse momento que a cultura deixa de produzir mais grãos em função da restrição de radiação solar. De acordo com nosso conhecimento, esse é o primeiro estudo que apresenta resultados de perda de produtividade por dia nublado em arroz irrigado cultivado em ambiente subtropical. Os resultados desse estudo indicam a necessidade da realização de trabalhos com esse tema para auxiliar o direcionamento dos programas de melhoramento na busca de cultivares mais eficientes no uso de radiação solar durante as fases finais do desenvolvimento da cultura.

Tabela 4. Perda de produtividade por dia nublado nas fases de desenvolvimento vegetativa, reprodutiva e de enchimento de grãos durante as estações de crescimento 2017/18 e 2018/19 em ambiente subtropical.

Fase	Produtividade total da fase (kg MJ ⁻¹)	Produtividade diária (kg MJ ⁻¹ dia ⁻¹)	Produtividade em dia límpido	Produtividade em dia nublado	Perda da produtividade por dia nublado
					kg ha ⁻¹ dia ⁻¹
V1-R1	95	2,02	48,1	20	28,1
R1-R4	359	11,6	241,3	115,2	126,1
R4-R9	425	12,5	266,2	124,1	142,1

Penalização da produtividade na fase vegetativa

A restrição de radiação solar na fase vegetativa provocou redução do NCm² em 11,3%, sendo responsável pela queda de 6,4% na produtividade. Porém, a redução do perfilhamento foi compensada pelas plantas através do aumento no NEP em 9,6%. Essa resposta ocorreu devido a retirada das telas de sombreamento sobre a cultura, restabelecendo as condições de radiação solar incidente durante as fases reprodutiva e de enchimento de grãos. Na China, Deng et al. (2009) utilizaram 50% de restrição de radiação solar de V1-R1 e observaram que a produtividade diminuiu 17,3% decorrente de um Npanm² 20,6% mais baixo. Com menor perfilhamento, os fotoassimilados são redistribuídos para outras estruturas morfológicas, como o aumento da área foliar e da altura das plantas (Deng et al., 2015; Li et al., 2010; Liu et al., 2020; Venkateswarlu et al., 1977; Vityakon et al., 1993; Wang et al., 2015).

Durante a estação de crescimento 2017/18 foram quantificados a altura das plantas e o comprimento da folha bandeira. Apesar de não observada diferença estatística entre a testemunha e o tratamento com 24% de restrição de radiação solar, os resultados foram semelhantes aos encontrados por Wu et al. (2017) na China. Na ocasião, os autores identificaram que 60% de restrição de radiação solar no durante a fase vegetativa ocasionou alongamento dos entrenós, aumentando o índice de acamamento das plantas. Do mesmo modo, não foi observada diferença significativa para o comprimento da folha bandeira quando comparado os tratamentos testemunha e o tratamento com 24% de restrição de radiação solar. É necessário que sejam realizados estudos como este durante a fase vegetativa que utilizem níveis de restrição de radiação solar mais intensos, visto que o maior comprimento da folha-bandeira gera sombreamento e prejudica a fotossíntese da panícula, reduzindo a produtividade (Makino et al., 2021).

Tabela 5. Altura de plantas e partição de matéria seca total nos níveis de 0% e 24% de sombreamento durante a fase vegetativa na estação de crescimento 2017/18. Letras diferentes indicam diferença significativa entre os tratamentos de acordo com o Teste t (LSD) a 1% de probabilidade de erro ($p < 0.01$).

Safras ¹	Local	Altura de plantas (cm)		Comprimento da folha bandeira (cm)		Matéria seca total em R1 ² (Mg ha ⁻¹)	
		0%	24%	0%	24%	0%	24%
	Santa Maria	100.9a	105.4a	33.9a	38a	6,4b	5,5b
2017/18	Cachoeirinha	84.2a	88.1a	-	-	7b	5,5b
	Itaqui	97.4a	98.2a	35.8a	37a	11,4a	10,4a
Média		94.2	97.2	34.8	37.5	7,9	7,5
CV (%)		3,3		8,9		13,3	

¹variáveis mensuradas apenas na safra 2017/18;

²mensurada em R1 para conhecer a partição de fotoassimilados durante toda fase vegetativa.

A redução da produtividade devido a restrição de radiação solar na fase vegetativa ocorre devido ao menor número de perfilhos e, conseqüentemente, menor acúmulo de matéria seca total pela cultura (Liu et al., 2014; Sridevi & Chellamuthu, 2015). Huan et al. (2016) atribuem maiores produtividades à maior produção de biomassa pela cultura, o que está associado à quantidade de radiação solar interceptada pela planta. O manejo da época de semeadura é o fator que pode mitigar esses efeitos, pois a antecipação da semeadura está relacionada ao alongamento da fase vegetativa devido ao efeito das temperaturas mais baixas, proporcionando mais tempo para o acúmulo de fotoassimilados (Junior et al., 2021; Streck et al., 2006).

Penalização da produtividade na fase reprodutiva

A restrição de radiação solar na fase reprodutiva reduziu 18% o NEP e 6.9% no NPanm², ocasionando declínio de 31.2% na produtividade. O NEP e NPanm² foram os componentes de rendimento mais penalizados durante a fase reprodutiva em Islam & Morison (1991), que observaram redução de 19% no NPanm² e 39.5% no NEP. Mesmo que o NCm² (relacionado ao Npanm²) tenha sido definido com 100% da radiação solar incidente, o déficit de radiação interferiu no processo de diferenciação quanto ao número e tamanho das panículas. Porém, além da disponibilidade de radiação solar, outros fatores de manejo podem limitar o NEP, como é o caso da adubação nitrogenada (Fageria, 2007; Pan et al., 2016).

Nos experimentos não foram avaliadas as relações entre sombreamento e Nitrogênio nos componentes e na produtividade, porém essa interação apresentou resultados significativos na região tropical da China (23°10' N, 113°18' E) (Pan et al., 2016). Neste estudo, Pan et al. (2016) utilizaram 3 doses de nitrogênio (0 kg ha⁻¹, 120 kg ha⁻¹ e 180 kg ha⁻¹) e 3 intensidades de sombreamento (0%, 11,5% e 33,2%) em 2011 e 2012 e observaram que a produtividade reduziu até 36% em todos os tratamentos de nitrogênio quanto mais intensa a restrição de radiação solar. Considerando a sustentabilidade da produção de arroz em ambiente subtropical, é possível ser mais assertivo na recomendação da adubação nitrogenada em anos de El Niño, otimizando o parcelamento da dose e reduzindo o impacto ambiental. Do mesmo modo, é possível otimizar o lucro do produtor rural pelo menor custo de produção. Dessa forma, é necessário que sejam realizados estudos que relacionam dose de nitrogênio e sombreamento em ambiente subtropical.

Penalização da produtividade na fase de enchimento de grãos

Durante a fase de enchimento de grãos, o NEV aumentou 27,6%, 30,2%, 47,8% devido a restrição de radiação solar de 24%, 36% e 43%, respectivamente, e a produtividade reduziu até 36% (Figura 4). De acordo com trabalhos recentes realizados na região subtropical da China, a produtividade pode sofrer perda de quase 50% devido ao NEV 48,4% maior quando o sombreamento ocorre 30 dias após o florescimento da cultura (Wang et al., 2015) e 53,9% por consequência da falha na polinização e redução no tamanho da espiguetas, ocasionando NEC 7,4% menor e taxa de enchimento de espiguetas 16,6% mais baixa (Deng et al., 2009). Isso indica que cultivares atuais de arroz cultivadas em ambiente subtropical penalizam a produtividade, principalmente, através do aumento do NEV por panícula (Figura 4).

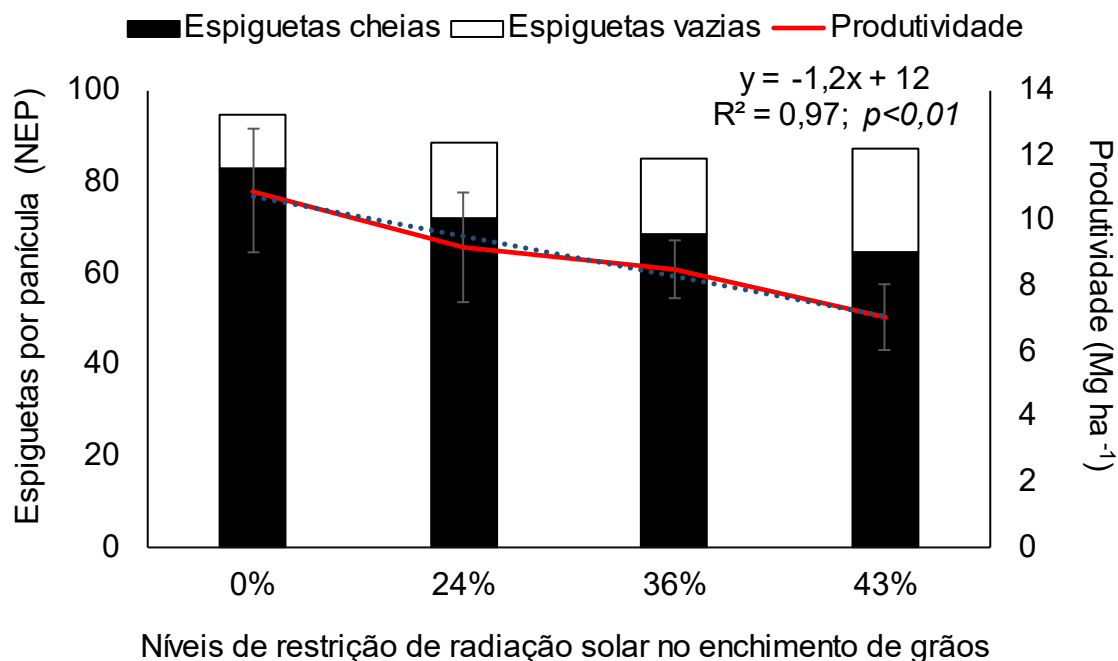


Figura 4. Número de espiguetas por panícula (NEP) durante o enchimento de grãos sob níveis de sombreamento de 0%, 24%, 36% e 43% e sua relação com a produtividade. As colunas indicam o NEP total. Colunas preenchidas em preto indicam o número de espiguetas cheias (NEC) e colunas sem preenchimento indicam o número de espiguetas vazias (NEV). As colunas estão relacionadas com o eixo Y da esquerda. A linha vermelha indica a produtividade de grãos e está relacionada com o eixo Y da direita. A linha azul pontilhada indica a regressão linear entre produtividade de grãos e níveis de restrição de radiação solar. As barras de erros indicam a faixa de variação da produtividade nos tratamentos. O $p < 0,01$ indica significância a 1% de probabilidade de erro.

Relação entre Coeficiente fototérmico e produtividade de grãos

O coeficiente fototérmico (Q) variou entre 0,6 e 1,9 MJ m⁻²dia⁻¹°C, indicando que maiores valores de Q estão relacionados à maior produtividade de grãos de arroz (Figura 5A). Esses resultados estão de acordo com a faixa de Q encontrado por Islam & Morison (1991), porém consideram outras fases que estes autores não analisaram. Outros trabalhos utilizaram o Q para explicar a variação da produtividade e dos componentes de rendimento com as condições ambientais (Ahmed et al., 2010; Ahmed et al., 2011; Cantagallo et al., 1997; Lazaro & Abbate, 2011; Magrin et al., 1993; Poggio et al., 2005; Tagliapietra et al., 2021; Zanon et al., 2016), porém não analisam o Q nas diferentes fases do

desenvolvimento, o que torna a análise menos precisa. É importante que a interação entre Q e produtividade seja avaliada ao longo do desenvolvimento da cultura, visto que a demanda por radiação solar e temperatura é distinta durante as fases vegetativa, reprodutiva e de enchimento de grãos (Yoshida & Parao, 1976).

O enchimento de grãos foi a fase do desenvolvimento mais responsiva ao Q, seguido das fases reprodutiva e vegetativa. As regressões lineares entre produtividade e Q indicam que 1 MJ m⁻²dia⁻¹°C corresponde a 6,9 Mg ha⁻¹, 5,4 Mg ha⁻¹ e 3,6 Mg ha⁻¹ de R4-R9, R1-R4 e V1-R1 no ambiente subtropical do Brasil, respectivamente (Figura 5B). Esse resultado diverge do que foi encontrado por Deng et al. (2015) na província de Hubei, região subtropical da China (30°06' N, 115°45' E), onde foi observada uma correlação negativa entre produtividade e radiação solar. Isso ocorreu devido a pequena faixa de radiação solar explorada (14,4 a 21,7 MJ m⁻²dia⁻¹, enquanto em nosso trabalho a variação média ocorreu entre 10,9 a 25,4 MJ m⁻²dia⁻¹) e pela hipótese de que a alta disponibilidade de radiação solar durante o enchimento de grãos foi acompanhada por altas temperaturas, prejudicando a produtividade de arroz. Além disso, Deng et al. (2015) analisam os efeitos da temperatura e da radiação solar através da relação entre produtividade e temperaturas acumuladas efetivas e da radiação solar acumulada de maneira separada, não utilizando o Q.

Isso indica que, além da radiação solar incidente ser um fator determinante para altas produtividades de arroz, temperaturas mais baixas durante as fases reprodutiva e de enchimento de grãos contribuem de forma significativa para maximizar a produtividade (Ahmed et al., 2014; Deng et al., 2015). Peng et al. (2004) relatam que menores produtividades estão associadas com o efeito da elevação da temperatura noturna em 1,13°C em série de dados a longo prazo. Ainda, indicam que a relação negativa entre o aumento das temperaturas mínimas e a produção de biomassa é 10% menor pra cada 1°C de aumento de temperatura noturna. Fisiologicamente, essa penalização ocorre pelo aumento da respiração das plantas, que gera maior perda de carbono que poderia ser utilizada para o enchimento de grãos (Impa et al., 2021).

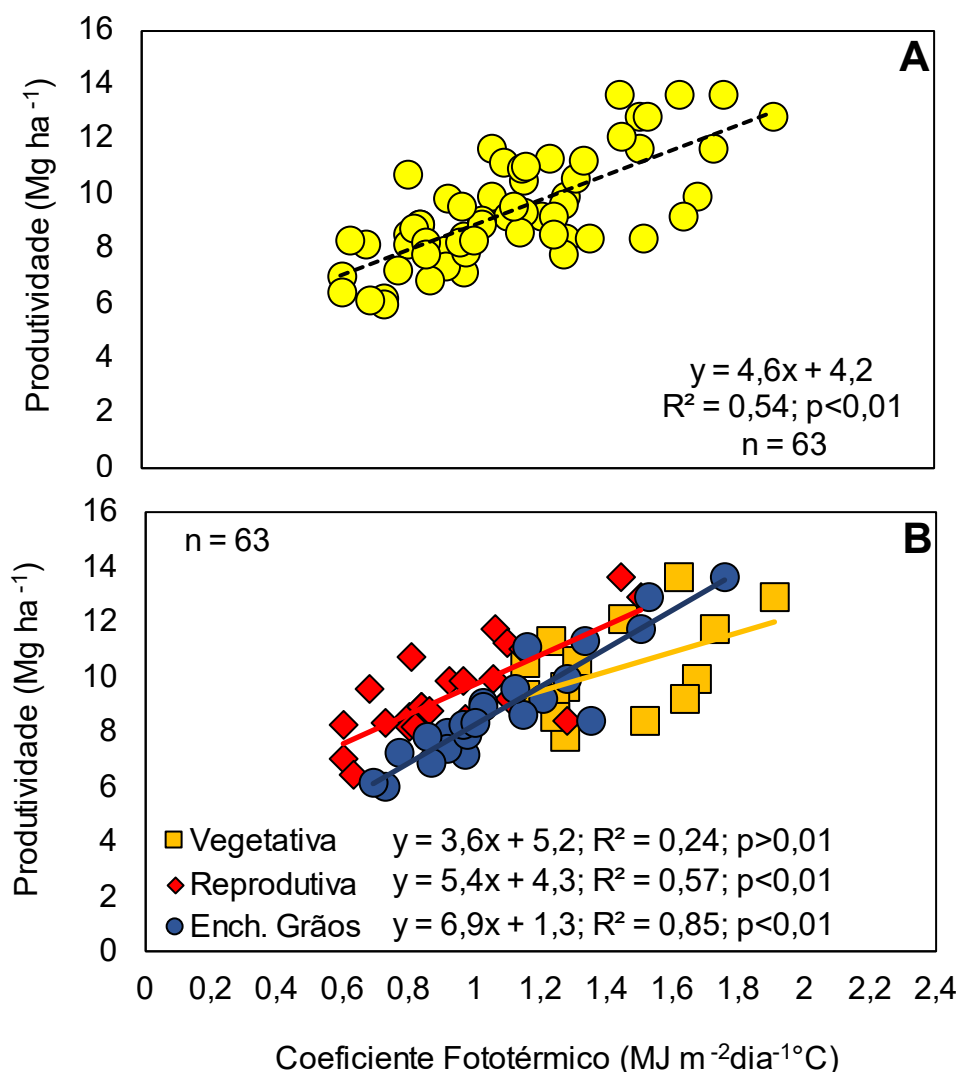


Figura 5. (A) Regressão linear entre Produtividade e Coeficiente Fototérmico para a estação de crescimento durante os anos agrícolas 2017/18 e 2018/19 em ambiente subtropical. (B) Regressões lineares entre Produtividade e Coeficiente Fototérmico por fase de desenvolvimento da cultura durante as estações de crescimento 2017/18 e 2018/19 em ambiente subtropical. O $p < 0,01$ indica significância a 1% de probabilidade de erro.

Este estudo contribui para a comunidade científica, orizicultores, técnicos e extensionistas, avançando nos conhecimentos sobre a relação entre a radiação solar e a produtividade de arroz irrigado no ambiente em que há um dos maiores Y_p de arroz no mundo. Quantificar a perda de produtividade em um dia nublado e identificar como a restrição de radiação solar penaliza os componentes de produtividade da cultura é importante para auxiliar os produtores de arroz no ajuste da época de semeadura e direcionar os programas

de melhoramento genético no desenvolvimento de cultivares convencionais mais eficientes no uso da radiação solar e tolerantes ao sombreamento. Além disso, ressaltam a importância do acompanhamento das previsões climáticas a respeito da probabilidade de ocorrência de El Niño para o planejamento da adubação nitrogenada. Futuramente, em que o suprimento de luminosidade será comum nas lavouras, os resultados deste trabalho serão utilizados por técnicos e produtores ao decidirem quando complementar a radiação solar reduzida por um dia nublado. Do mesmo modo, os trabalhos futuros com este tema devem considerar a importância da temperatura durante a estação de crescimento da cultura através do coeficiente fototérmico, que está relacionado com a produtividade de grãos. Essas práticas somadas requerem planejamento antecipado e são fundamentais para explorar a lacuna de produtividade no ambiente subtropical do Brasil.

CONCLUSÕES

- (1) A fase de desenvolvimento do arroz irrigado mais afetada pela restrição de radiação solar em ambiente subtropical é o enchimento de grãos, seguido das fases reprodutiva e vegetativa.
- (2) A perda de produtividade em arroz irrigado por dia nublado é de $142 \text{ kg}^{-1} \text{ dia}^{-1}$, $126 \text{ kg}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ e $28 \text{ kg}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ de R4-R9, R1-R4 e V1-R1, respectivamente.

AGRADECIMENTOS

Aos extensionista do 37° e 6° NATE do IRGA, Gionei Alves de Assis dos Santos, Pablo Mazzuco Souza, Débora da Cunha Mostardeiro Pontelli, Giovani Wrasse e Cássio Wilhelm pelo auxílio na avaliação dos experimentos. Ao Sindicato Rural de Itaqui e Maçambará e aos amigos Prof. Cleber Maus Alberto, Lorenzo Meus e Felipe Schmidt por liderarem a condução dos experimentos na Unipampa, em Itaqui, RS. Ao pesquisador do IRGA de Cachoeirinha, Sr. Fernando Miranda e equipe pelo auxílio na condução dos experimentos na Estação Experimental do Arroz. Aos produtores Evandro Pozzobon, Guilherme Pozzobon e Clécio Karsburg e Renato Zilmer pelo empréstimo das áreas para a realização do experimento em Santa Maria e Agudo, RS, respectivamente e por acreditarem na importância deste trabalho para a cadeia orizícola do RS. Muito obrigado!

REFERÊNCIAS

Ahmed, M., Asim, M., et al. (2010). Correlation of photothermal quotient with spring wheat yield. *African Journal of Biotechnology*, 9(46), 869-7852. DOI: 10.5897/AJB10.1288

Ahmed, M., Hassan, F. U., et al. (2011). Is photothermal quotient determinant factor for spring wheat yield? *Pak J Bot*, 43(3), 1621-1622.

Alridiwirah, EM Harahap, Akoeb, EN., & Hanum, H. (2018). Growth and production of new superior rice varieties in the shade intensity. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 122, No. 1). IOP Publishing. DOI: 10.1088/1755-1315/122/1/012024

Alvares, CA., Stape, JL., et al. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6), 711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>

Arsego, DA., Ferraz, SET., et al. (2020). Índices Climáticos Associados a Variabilidade Interanual da Produtividade de Arroz no Rio Grande do Sul. (In Portuguese, with English abstract.) *Revista Brasileira de Meteorologia*, 35(2), 209-218. <https://doi.org/10.1590/0102-7786351033>

Cantagallo, J. E., Chimenti, C. A., & Hall, A. J. (1997). Number of seeds per unit area in sunflower correlates well with a photothermal quotient. *Crop Science*, 37(6), 1780-1786. <https://doi.org/10.2135/cropsci1997.0011183X003700060020x>

Chen, H., Li, QP., et al (2019). Effect of different shading materials on grain yield and quality of rice. *Scientific reports*, 9(1), 1-9. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46437-9>

CONAB – Campanha Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira: grãos. Available in: < http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17_08_10_11_27_12_bol_etim_graos_agosto_2021.pdf >. (accessed 10 may. 2021).

Counce, PA., Keisling, TC., & Mitchell, AJ. (2000). A uniform, objective, and adaptive system for expressing rice development. *Crop Science*, 40(2), 436-443. <https://doi.org/10.2135/cropsci2000.402436x>

De Souza Custodio, M. (2016). Índice de nebulosidade do estado do Rio Grande do Sul: climatologia e impactos do El Niño Oscilação Sul. (In Portuguese, with English abstract.) *Ciência e Natura*, 38(1), 382-392. DOI:10.5902/2179-460X18175

De Freitas, GN., de Quadro, FL., & Vitor, A. (2020). Análise das variáveis agroclimáticas na estimativa de produtividade do arroz irrigado em Uruguaiana, Rio Grande do Sul. (In Portuguese, with English abstract.) *Revista Brasileira de Climatologia*, 27. <http://dx.doi.org/10.5380/rbclima.v27i0.72866>

Deng, F., Wang, L., et al. (2009). Effects of different-growing-stage shading on rice grain-filling and yield. (In Chinese, with English abstract.) *Journal of Sichuan Agricultural University*, 27(3), 265-269.

Deng, N., Ling, X., et al. (2015). Influence of temperature and solar radiation on grain yield and quality in irrigated rice system. *European Journal of Agronomy*, 64, 37-46. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2014.12.008>

Deng, F., Li, Q., et al. (2021). Relationship between chalkiness and the structural and thermal properties of rice starch after shading during grain-filling stage. *Carbohydrate Polymers*, 252, <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117212>

Dutta, SS., Pale, G., et al. (2017). Effect of low light intensity on key traits and genotypes of hilly rice (*Oryza sativa*) germplasm. *Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences*, DOI: [http://dx.doi.org/10.18006/2017.5\(4\).463.471](http://dx.doi.org/10.18006/2017.5(4).463.471)

Espe, MB., Cassman, KG., et al (2016). Yield gap analysis of US rice production systems shows opportunities for improvement. *Field Crops Research*, 196, 276–283. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.07.011>

Fageria, N. K. (2007). Yield physiology of rice. *Journal of plant nutrition*, 30(6), 843-879. <https://doi.org/10.1080/15226510701374831>

Faostat. Food and Agriculture Organization of the United Nations Statistics Division. Agricultural production [Database]. FAO, Rome, Italy. Available in: <<http://faostat.fao.org/home/>>. (accessed 23 Apr. 2021).

Heinemann, A. B., Stone, L. F., et al. (2006). Eficiência de uso da radiação solar na produtividade do trigo decorrente da adubação nitrogenada. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 10(2), 352-356. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662006000200015>

Heinemann, AB, Ramirez-Villegas, J., R. et al (2019). Upland rice breeding led to increased drought sensitivity in Brazil. *Field Crops Research*, 231, 57–67. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.11.009>

Huang, M., Shan, S., et al. (2016). Leaf photosynthetic performance related to higher radiation use efficiency and grain yield in hybrid rice. *Field Crops Research*, 193, 87-93. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.03.009>

Impa, S. M., Raju, B., et al. (2021). High night temperature effects on wheat and rice: Current status and way forward. *Plant, Cell & Environment*. <https://doi.org/10.1111/pce.14028>

IRGA – Instituto Rio Grandense do Arroz. Série Histórica de Produção e Produtividade - RS x BR. Available in: <<http://www.irga.rs.gov.br>>. (accessed 12 mar. 2021).

Islam, M. S., & Morison, J. I. L. (1992). Influence of solar radiation and temperature on irrigated rice grain yield in Bangladesh. *Field Crops Research*, 30(1-2), 13-28. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(92\)90053-C](https://doi.org/10.1016/0378-4290(92)90053-C)

Ishimaru, T., Xaiyalath, S., et al. (2016). Quantifying rice spikelet sterility in potential heat-vulnerable regions: Field surveys in Laos and southern India. *Field Crops Research*, 190, 3-9. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2015.08.006>

Junior A.J.D., Streck NA, Zanon A.J., et al. (2021). Rice yield potential as a function of sowing date in southern Brazil. *Agronomy Journal*. 1-12. <https://doi.org/10.1002/agj220610.20610>

Júnior, R.D.S.N. & Sentelhas, P.C. (2019). Soybean-maize off-season double crop system in Brazil as affected by El Niño Southern Oscillation phases. *Agricultural Systems*, 173, 254-267. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.03.012>

Klering, E.V., Fontana, D.C., et al. (2016). Modelo agrometeorológico-espectral para estimativa da produtividade de grãos de arroz irrigado no Rio Grande do Sul. *Bragantia*, 75(2), 247-256. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.287>

Kobata, T., Ishi, H., & Iwasaki, H. (2017). A Reduction in Spikelet Number and Fertility Causes Yield Vulnerability in High-Yielding Rice. *Agronomy Journal*, 109(1), 175-184. <https://doi.org/10.2134/agronj2016.05.0274>

Li, Q-P., Deng, F., Chen, H., et al. (2020). Shading decreases rice yield by impeding grain-filling progress after heading. *Agronomy Journal*. 112:4018–4030. <https://doi.org/10.1002/agj2.20372>

Liu, Q. H., Xiu, W. U., Chen, B. C., & Jie, G. A. O. (2014). Effects of low light on agronomic and physiological characteristics of rice including grain yield and quality. *Rice science*, 21(5), 243-251. [https://doi.org/10.1016/S1672-6308\(13\)60192-4](https://doi.org/10.1016/S1672-6308(13)60192-4)

Magrin, G. O., Hall, A. J., Baldy, C. H., & Grondona, M. O. (1993). Spatial and interannual variations in the photothermal quotient: implications for the potential kernel number of wheat crops in Argentina. *Agricultural and Forest Meteorology*, 67(1-2), 29-41. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(93\)90048-M](https://doi.org/10.1016/0168-1923(93)90048-M)

Makino, Y., Hirooka, Y., et al. (2021). Effect of flag leaf length of erect panicle rice on the canopy structure and biomass production after heading. *Plant Production Science*, 1-10. <https://doi.org/10.1080/1343943X.2021.1908152>.

Oliveira, C. (2017). Mudanças fisiológicas e moleculares na cultura do arroz e em plantas daninhas C3 e C4 submetidas a estresses abióticos. 166f. Tese (Doutorado). (In Portuguese, with English abstract). Programa de Pós-Graduação em Fitossanidade. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

Pan, S., Liu, H., et al. (2016). Effects of nitrogen and shading on root morphologies, nutrient accumulation, and photosynthetic parameters in different rice genotypes. *Scientific reports*, 6(1), 1-14. DOI: 10.1038/srep32148

Peng, S., Huang, J., et al. (2004). Rice yields decline with higher night temperature from global warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101(27), 9971-9975. <https://doi.org/10.1073/pnas.0403720101>

Poggio, S. L., Satorre, E. H., Dethiou, S., & Gonzalo, G. M. (2005). Pod and seed numbers as a function of photothermal quotient during the seed set period of field pea (*Pisum sativum*) crops. *European Journal of Agronomy*, 22(1), 55-69. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2003.12.003>

Ribas, G. G., Streck, N. A., et al. (2016). Acúmulo de matéria seca e produtividade em híbridos de arroz irrigado simulados com o modelo SimulArroz. (In Portuguese, with English abstract). *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 51(12), 1907-1917. <https://doi.org/10.1590/S0100-04X2016001200001>.

Ribas, G.G. (2020). Yield potential and yield gap for irrigated rice in Rio Grande do Sul. *PhD Dissertation*. Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil.

Ribas, GG, Zanon, AJ, et al. (2021). Assessing yield and economic impact of introducing soybean to the lowland rice system in southern Brazil. *Agricultural Systems*. 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.103036>.

Rosa, H. T., Walter, L. C., et al. (2015). Simulação do crescimento e produtividade de arroz no Rio Grande do Sul pelo modelo SimulArroz. (In Portuguese with English abstract). *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 19(12), 1159-1165. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n12p1159-1165>

Silva, R. R., Benin, G., et al. (2014). The use of photothermal quotient and frost risk to identify suitable sowing dates for wheat. *Acta Scientiarum Agronomy*, 36(1), 99-110. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v36i1.14854>

Sridevi, V., & Chellamuthu, V., (2015). Impact of weather on rice—A review. *International Journal of Applied Research*, v. 1, n. 9, p. 825-831.

Stansel, J. W. (1975). Rice plant--its development and yield. *Research monograph-Texas Agricultural Experiment Station*.

Steinmetz, S., Deibler, A. N., & Silva, J. B. D. (2013). Estimativa da produtividade de arroz irrigado em função da radiação solar global e da temperatura mínima do ar. (In Portuguese, with English abstract). *Ciência Rural*, 43(2), 206-211. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782013000200003>

Streck, N. A., Bosco, L. C., et al. (2006). Duração do ciclo de desenvolvimento de cultivares de arroz em função da emissão de folhas no colmo principal. (In

- Portuguese, with English abstract). *Ciência Rural*, 36 (4), 1086-1093. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782006000400007>
- Tagliapietra, E.L., Zanon, A.J., Streck, N.A., et al. (2021). Biophysical and management factors causing yield gap in soybean in the subtropics of Brazil. *Agronomy Journal*. 113: 1-13. <https://doi.org/10.1002/agj2.20586>
- Tsukaguchi, T., Tanaka, R., Inoue, H., & Nakagawa, H. (2018). Effects of high temperature and shading on grain abscisic acid content and grain filling pattern in rice (*Oryza sativa* L.). *Plant Production Science*. 21(4), 407-412. <https://doi.org/10.1080/1343943X.2018.1524264>
- Van Ittersum, M. K., Cassman, K. G., Grassini, P., et al. (2013). Yield gap analysis with local to global relevance—a review. *Field Crops Research*, 143, 4-17. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.09.009>
- Van Ittersum, MK. and Rabbinge, R. (1997). Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations. *Field Crops Research*, v. 52, p. 197-208. DOI: 10.1016/S0378-4290(97)00037-3
- Venkateswarlu, B. (1977). Influence of low light intensity on growth and productivity of rice, *Oryza sativa*, L. *Plant and Soil*, 46(3), 713-719.
- Vityakon, P., Sae-Lee, S., & Seripong, S. (1993). Effects of tree leaf litter and shading on growth and yield of paddy rice in Northeast Thailand. *Agriculture and Natural Resources*, 27(2), 219-222.
- Wang, L., Deng, F., Ren, WJ., & Yang, WY. (2013). Effects of shading on starch pasting characteristics of indica hybrid rice (*Oryza sativa* L.). *PLOS one*. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0068220>
- Wang, L., Deng, F., & Ren, W. J. (2015). Shading tolerance in rice is related to better light harvesting and use efficiency and grain filling rate during grain filling period. *Field Crops Research*, 180, 54-62. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.05.010>
- Wu, L., Zhang, W., et al. (2017). Shading contributes to the reduction of stem mechanical strength by decreasing cell wall synthesis in japonica rice (*Oryza sativa* L.). *Frontiers in Plant Science*, 8, 881. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00881>
- Yang, L., & Wang, Y. (2019). Impact of climate change on rice grain quality. *Rice: Chemistry and Technology*, 427-441. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811508-4.00013-7>
- Yoshida, S., & Parao, FT. (1976). Climatic influence on yield and yield components of lowland rice in the tropics. *Climate and rice*, 20, 471-494. Los Baños, Philippines: International Rice Research Institute.

Yoshida, S. (1981). *Fundamentals of rice crop science*. Los Baños, Philippines: International Rice Research Institute.

Zanon, A. J., Streck, N. A., & Grassini, P. (2016). Climate and management factors influence soybean yield potential in a subtropical environment. *Agronomy Journal*, 108, 1447–1454. <https://doi.org/10.2134/agronj2015.0535>

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através dos resultados deste trabalho é possível compreender a importância da radiação solar para explorar a lacuna de produtividade de arroz irrigado em ambiente subtropical. O melhor aproveitamento deste recurso natural está associado à época da semeadura, uma prática de manejo que não agrega custos ao produtor, mas que necessita ser bem planejada. É essencial compreender que o ciclo da cultura ocorre em etapas e a necessidade de radiação solar depende da fase de desenvolvimento. Nesse sentido, uma atenção maior deve ser dada ao enchimento de grãos, pois o impacto da restrição de radiação solar é mais intenso durante esta fase. Acreditamos que esses resultados possam ser utilizados por melhoristas para a seleção de cultivares tolerantes ao sombreamento e mais eficientes no uso de radiação solar durante as fases mais críticas para minimizar a perda de produtividade por dia nublado. Futuramente, em que o suprimento de luminosidade será comum nas lavouras, os resultados deste trabalho serão utilizados por técnicos e produtores ao decidirem quando complementar a radiação solar reduzida por um dia nublado. Esperamos que mais estudos que relacionem radiação solar e produtividade de arroz sejam desenvolvidos para esta região para que mais informações sejam geradas para os produtores.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abeyasingha, N. S., Singh, M., Islam, A., & Sehgal, V. K. (2016). Climate change impacts on irrigated rice and wheat production in Gomti River basin of India: a case study. *SpringerPlus*, 5(1), 1-20. DOI 10.1186/s40064-016-2905-y

Ahmed, M., Asim, M., et al. (2010). Correlation of photothermal quotient with spring wheat yield. *African Journal of Biotechnology*, 9(46), 869-7852. DOI: 10.5897/AJB10.1288

Ahmed, M., Hassan, F. U., et al. (2011). Is photothermal quotient determinant factor for spring wheat yield? *Pak J Bot*, 43(3), 1621-1622.

Alridiwirah, EM Harahap, Akoeb, EN., & Hanum, H. (2018). Growth and production of new superior rice varieties in the shade intensity. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 122, No. 1). IOP Publishing. DOI: 10.1088/1755-1315/122/1/012024

Alvares, CA., Stape, JL., et al. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6), 711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>

Arsego, DA., Ferraz, SET., et al. (2020). Índices Climáticos Associados a Variabilidade Interanual da Produtividade de Arroz no Rio Grande do Sul. (In Portuguese, with English abstract.) *Revista Brasileira de Meteorologia*, 35(2), 209-218. <https://doi.org/10.1590/0102-7786351033>

Barrios-Perez, C., et al. (2021). How does El Niño Southern Oscillation affect rice-producing environments in central Colombia?. *Agricultural and Forest Meteorology*, 306, 108443. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108443>

Berlato, M. A., & Fontana, D. C. (2001). Impacts of El Niño and La Niña on agricultural production in southern Brazil and the use of climate forecasts in agriculture. *Applications of climate forecasting for better decisionmaking processes in agriculture. Passo Fundo: Embrapa Trigo*, 217-241.

Cantagallo, J. E., Chimenti, C. A., & Hall, A. J. (1997). Number of seeds per unit area in sunflower correlates well with a photothermal quotient. *Crop Science*, 37(6), 1780-1786. <https://doi.org/10.2135/cropsci1997.0011183X003700060020x>

Carlos, F. S. (2017). Índices de qualidade do solo em sistemas de produção de arroz irrigado. UFRGS. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/172113>>. Acesso em 21 Jan 2021.

Chen, H., Li, QP., et al (2019). Effect of different shading materials on grain yield and quality of rice. *Scientific reports*, 9(1), 1-9. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46437-9>

CONAB – Campanha Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira: grãos. Available in: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17_08_10_11_27_12_bol_etim_graos_agosto_2021.pdf>. (accessed 10 may. 2021).

Counce, PA., Keisling, TC., & Mitchell, AJ. (2000). A uniform, objective, and adaptive system for expressing rice development. *Crop Science*, 40(2), 436-443. <https://doi.org/10.2135/cropsci2000.402436x>

Cunha, G. D. (1999). El Niño Oscilação Sul e perspectivas climáticas aplicadas no manejo de culturas no sul do Brasil. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 7(2), 277-284.

De Freitas, GN., de Quadro, FL., & Vitor, A. (2020). Análise das variáveis agroclimáticas na estimativa de produtividade do arroz irrigado em Uruguaiana, Rio Grande do Sul. (In Portuguese, with English abstract.) *Revista Brasileira de Climatologia*, 27. <http://dx.doi.org/10.5380/rbclima.v27i0.72866>

De Souza Custodio, M. (2016). Índice de nebulosidade do estado do Rio Grande do Sul: climatologia e impactos do El Niño Oscilação Sul. (In Portuguese, with English abstract.) *Ciência e Natura*, 38(1), 382-392. DOI:10.5902/2179-460X18175

Deng, F., Li, Q., et al. (2021). Relationship between chalkiness and the structural and thermal properties of rice starch after shading during grain-filling stage. *Carbohydrate Polymers*, 252, <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117212>

Deng, F., Wang, L., et al. (2009). Effects of different-growing-stage shading on rice grain-filling and yield. (In Chinese, with English abstract.) *Journal of Sichuan Agricultural University*, 27(3), 265-269.

Deng, N., Ling, X., et al. (2015). Influence of temperature and solar radiation on grain yield and quality in irrigated rice system. *European Journal of Agronomy*, 64, 37-46. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2014.12.008>

Dutta, SS., Pale, G., et al. (2017). Effect of low light intensity on key traits and genotypes of hilly rice (*Oryza sativa*) germplasm. *Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences*, DOI: [http://dx.doi.org/10.18006/2017.5\(4\).463.471](http://dx.doi.org/10.18006/2017.5(4).463.471)

Espe, MB., Cassman, KG., et al (2016). Yield gap analysis of US rice production systems shows opportunities for improvement. *Field Crops Research*, 196, 276–283. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.07.011>

Fageria, N. K. (2007). Yield physiology of rice. *Journal of plant nutrition*, 30(6), 843-879. <https://doi.org/10.1080/15226510701374831>

Faostat. Food and Agriculture Organization of the United Nations Statistics Division. Agricultural production [Database]. FAO, Rome, Italy. Available in: <<http://faostat.fao.org/home/>>. (Accessed 23 Apr. 2021).

Fedorov, A. V., & Philander, S. G. (2000). Is El Niño changing? *Science*, 288(5473), 1997-2002. DOI: 10.1126/science.288.5473.1997

Gelcer, E., F., et al. (2013). Effects of El Niño Southern Oscillation on the space–time variability of Agricultural Reference Index for Drought in midlatitudes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 174, 110-128. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.02.006>

Grimm, A. M. (2003). The El Niño impact on the summer monsoon in Brazil: regional processes versus remote influences. *Journal of Climate*, 16(2), 263-280. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016<0263:TENIOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016<0263:TENIOT>2.0.CO;2)

Grimm, A. M., et al., (1998). Precipitation anomalies in southern Brazil associated with El Niño and La Niña events. *Journal of climate*, 11(11), 2863-2880. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1998\)011<2863:PAISBA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1998)011<2863:PAISBA>2.0.CO;2)

Heinemann, A. B., et al. (2021). The impact of El Niño Southern Oscillation on cropping season rainfall variability across Central Brazil. *International Journal of Climatology*, 41, E283-E304. <https://doi.org/10.1002/joc.6684>

Heinemann, A. B., Stone, L. F., et al. (2006). Eficiência de uso da radiação solar na produtividade do trigo decorrente da adubação nitrogenada. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 10(2), 352-356. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662006000200015>

Heinemann, AB, Ramirez-Villegas, J., R. et al (2019). Upland rice breeding led to increased drought sensitivity in Brazil. *Field Crops Research*, 231, 57–67. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.11.009>

Herbert, J. M., & Dixon, R. W. (2002). Is the ENSO phenomenon changing as a result of global warming?. *Physical Geography*, 23(3), 196-211. <https://doi.org/10.2747/0272-3646.23.3.196>

Huang, M., Shan, S., et al. (2016). Leaf photosynthetic performance related to higher radiation use efficiency and grain yield in hybrid rice. *Field Crops Research*, 193, 87-93. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.03.009>

Impa, S. M., Raju, B., et al. (2021). High night temperature effects on wheat and rice: Current status and way forward. *Plant, Cell & Environment*. <https://doi.org/10.1111/pce.14028>

IRGA – Instituto Rio Grandense do Arroz. Série Histórica de Produção e Produtividade - RS x BR. Available in: <<http://www.irga.rs.gov.br>>. (accessed 12 mar. 2021).

IPCC Climate Change, 2007. The physical science basis. In: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, pp. 241–253.

Ishimaru, T., Xaiyalath, S., et al. (2016). Quantifying rice spikelet sterility in potential heat-vulnerable regions: Field surveys in Laos and southern India. *Field Crops Research*, 190, 3-9. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2015.08.006>

Islam, M. S., & Morison, J. I. L. (1992). Influence of solar radiation and temperature on irrigated rice grain yield in Bangladesh. *Field Crops Research*, 30(1-2), 13-28. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(92\)90053-C](https://doi.org/10.1016/0378-4290(92)90053-C).

JMA. 2016. Climate change monitoring report. Japan Meteorol. Agency. Disponível em: <[http:// www.jma.go.jp/jma/index.html](http://www.jma.go.jp/jma/index.html)>. Acesso em 12 Ago. 2019.

Junior A.J.D., Streck NA, Zanon A.J., et al. (2021). Rice yield potential as a function of sowing date in southern Brazil. *Agronomy Journal*. 1-12. <https://doi.org/10.1002/agj220610.20610>

Júnior, R.D.S.N. & Sentelhas, P.C. (2019). Soybean-maize off-season double crop system in Brazil as affected by El Niño Southern Oscillation phases. *Agricultural Systems*, 173, 254-267. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.03.012>

Klering, E.V., Fontana, D.C., et al. (2016). Modelo agrometeorológico-espectral para estimativa da produtividade de grãos de arroz irrigado no Rio Grande do Sul. *Bragantia*, 75(2), 247-256. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.287>

Kobata, T., Ishi, H., & Iwasaki, H. (2017). A Reduction in Spikelet Number and Fertility Causes Yield Vulnerability in High-Yielding Rice. *Agronomy Journal*, 109 (1), 175-184. <https://doi.org/10.2134/agronj2016.05.0274>

Li, Q-P., Deng, F., Chen, H., et al. (2020). Shading decreases rice yield by impeding grain-filling progress after heading. *Agronomy Journal*. 112:4018–4030. <https://doi.org/10.1002/agj2.20372>

Liu, Q. H., Xiu, W. U., Chen, B. C., & Jie, G. A. O. (2014). Effects of low light on agronomic and physiological characteristics of rice including grain yield and quality. *Rice science*, 21(5), 243-251. [https://doi.org/10.1016/S1672-6308\(13\)60192-4](https://doi.org/10.1016/S1672-6308(13)60192-4)

Magrin, G. O., Hall, A. J., Baldy, C. H., & Grondona, M. O. (1993). Spatial and interannual variations in the photothermal quotient: implications for the potential kernel number of wheat crops in Argentina. *Agricultural and Forest Meteorology*, 67(1-2), 29-41. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(93\)90048-M](https://doi.org/10.1016/0168-1923(93)90048-M)

Makino, Y., Hirooka, Y., et al. (2021). Effect of flag leaf length of erect panicle rice on the canopy structure and biomass production after heading. *Plant Production Science*, 1-10. <https://doi.org/10.1080/1343943X.2021.1908152>

Matzenauer, R., Radin, B., & Maluf, J. R. T. (2018). O fenômeno ENOS e o regime de chuvas no Rio Grande do Sul. *Agrometeoros*, 25(2). <http://dx.doi.org/10.31062/agrom.v25i2.25510>

Meus, L. D., et al., (2020). Ecofisiologia do arroz visando altas produtividades. Santa Maria: [s.n.], 2020.

Monteith, J. L. (1972). Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of applied ecology*, 9(3), 747-766. <https://doi.org/10.2307/2401901>

Nascimento, M. F. (2019). O fenômeno ENOS e variabilidade na produtividade de Arroz irrigado simulado pelo modelo SimulArroz. 20p. Trabalho de Conclusão

de Curso (Graduação em Agronomia). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2019.

Naylor, R. L., Falcon, W. P., Rochberg, D., & Wada, N. (2001). Using El Niño/Southern Oscillation climate data to predict rice production in Indonesia. *Climatic Change*, 50(3), 255-265. <https://doi.org/10.1023/A:1010662115348>

Nóia Júnior, R.S.; Sentelhas, P.C. (2019a). Soybean-maize off-season double crop system in Brazil as affected by El Niño Southern Oscillation phases, *Agricultural Systems*, 173: 254-267, <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.03.012>.

Pan, S., Liu, H., et al. (2016). Effects of nitrogen and shading on root morphologies, nutrient accumulation, and photosynthetic parameters in different rice genotypes. *Scientific reports*, 6(1), 1-14. DOI: 10.1038/srep32148

Peng, S., Huang, J., et al. (2004). Rice yields decline with higher night temperature from global warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101(27), 9971-9975. <https://doi.org/10.1073/pnas.0403720101>

Peng, S., Cassman, K. G., Virmani, S. S., Sheehy, J., & Khush, G. S. (1999). Yield potential trends of tropical rice since the release of IR8 and the challenge of increasing rice yield potential. *Crop Science*, 39(6), 1552-1559.

Poggio, S. L., Satorre, E. H., Dethiou, S., & Gonzalo, G. M. (2005). Pod and seed numbers as a function of photothermal quotient during the seed set period of field pea (*Pisum sativum*) crops. *European Journal of Agronomy*, 22(1), 55-69. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2003.12.003>

Reyes, M. L. F., & David, W. P. (2009). The effect of El Niño on rice production in the Philippines. *Philippine Agricultural Scientist*, 92(2), 170-185.

Ribas, G. G., Streck, N. A., et al. (2016). Acúmulo de matéria seca e produtividade em híbridos de arroz irrigado simulados com o modelo SimulArroz. (In Portuguese, with English abstract.). *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 51(12), 1907-1917. <https://doi.org/10.1590/S0100-04X2016001200001>.

Ribas, G.G. (2020). Yield potential and yield gap for irrigated rice in Rio Grande do Sul. *PhD Dissertation*. Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil.

Ribas, GG, Zanon, AJ, et al. (2021). Assessing yield and economic impact of introducing soybean to the lowland rice system in southern Brazil. *Agricultural Systems*. 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.103036>.

Ribas, G. G., et al., (2021). Assessing factors related to yield gaps in flooded rice in Southern Brazil. *Agronomy Journal*. <https://doi.org/10.1002/agj2.20754>

Roberts, M. G., Dawe, D., Falcon, W. P., & Naylor, R. L. (2009). El Niño–Southern Oscillation impacts on rice production in Luzon, the Philippines. *Journal of*

applied meteorology and climatology, 48(8), 1718-1724.
<https://doi.org/10.1175/2008JAMC1628.1>

Rosa, H. T., Walter, L. C., et al. (2015). Simulação do crescimento e produtividade de arroz no Rio Grande do Sul pelo modelo SimulArroz. (In Portuguese with English abstract). *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 19(12), 1159-1165. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n12p1159-1165>

Shao, L., (2021). The impact of global dimming on crop yields is determined by the source–sink imbalance of carbon during grain filling. *Global Change Biology*, 27(3), 689-708. <https://doi.org/10.1111/gcb.15453>

Shuai, J., Zhang, Z., Liu, X., Chen, Y., Wang, P., & Shi, P. (2013). Increasing concentrations of aerosols offset the benefits of climate warming on rice yields during 1980–2008 in Jiangsu Province, China. *Regional Environmental Change*, 13(2), 287-297. DOI 10.1007/s10113-012-0332-3

Silva, R. R., Benin, G., et al. (2014). The use of photothermal quotient and frost risk to identify suitable sowing dates for wheat. *Acta Scientiarum Agronomy*, 36(1), 99-110. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v36i1.14854>

Sridevi, V., & Chellamuthu, V., (2015). Impact of weather on rice—A review. *International Journal of Applied Research*, v. 1, n. 9, p. 825-831.

Stanhill, G., & Cohen, S. (2001). Global dimming: a review of the evidence for a widespread and significant reduction in global radiation with discussion of its probable causes and possible agricultural consequences. *Agricultural and forest meteorology*, 107(4), 255-278. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(00\)00241-0](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(00)00241-0)

Stansel, J. W. (1975). Rice plant--its development and yield. *Research monograph-Texas Agricultural Experiment Station*.

Steinmetz, S., Deibler, A. N., & Silva, J. B. D. (2013). Estimativa da produtividade de arroz irrigado em função da radiação solar global e da temperatura mínima do ar. (In Portuguese, with English abstract). *Ciência Rural*, 43(2), 206-211. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782013000200003>

Stocker, T. (Ed.). (2014). Climate change 2013: the physical science basis: Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University Press*. Disponível em: < https://www.researchgate.net/profile/Abha-Chhabra/publication/271702872_Carbon_and_Other_Biogeochemical_Cycles/links/54cf9ce80cf24601c094a45e/Carbon-and-Other-Biogeochemical-Cycles.pdf>. Acesso em 13 Jun. 2021.

Streck, N. A., Bosco, L. C., et al. (2006). Duração do ciclo de desenvolvimento de cultivares de arroz em função da emissão de folhas no colmo principal. (In

Portuguese, with English abstract). *Ciência Rural*, 36 (4), 1086-1093. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782006000400007>

Tagliapietra, E.L., Zanon, A.J., Streck, N.A., et al. (2021). Biophysical and management factors causing yield gap in soybean in the subtropics of Brazil. *Agronomy Journal*. 113: 1-13. <https://doi.org/10.1002/agj2.20586>

Tao, F. (2008). Global warming, rice production, and water use in China: developing a probabilistic assessment. *Agricultural and forest meteorology*, 148(1), 94-110. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2007.09.012>.

Tsukaguchi, T., Tanaka, R., Inoue, H., & Nakagawa, H. (2018). Effects of high temperature and shading on grain abscisic acid content and grain filling pattern in rice (*Oryza sativa* L.). *Plant Production Science*. 21(4), 407-412. <https://doi.org/10.1080/1343943X.2018.1524264>

Van Ittersum, M. K., Cassman, K. G., Grassini, P., et al. (2013). Yield gap analysis with local to global relevance—a review. *Field Crops Research*, 143, 4-17. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.09.009>

Van Ittersum, MK. and Rabbinge, R. (1997). Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations. *Field Crops Research*, v. 52, p. 197-208. DOI: 10.1016/S0378-4290(97)00037-3

Van Oort, P. A., & Zwart, S. J. (2018). Impacts of climate change on rice production in Africa and causes of simulated yield changes. *Global change biology*, 24(3), 1029-1045. <https://doi.org/10.1111/gcb.13967>

Venkateswarlu, B. (1977). Influence of low light intensity on growth and productivity of rice, *Oryza sativa*, L. *Plant and Soil*, 46(3), 713-719.

Vityakon, P., Sae-Lee, S., & Seripong, S. (1993). Effects of tree leaf litter and shading on growth and yield of paddy rice in Northeast Thailand. *Agriculture and Natural Resources*, 27(2), 219-222.

Walter, L. C., (2010). Mudança climática e seus efeitos na cultura do arroz. *Ciência Rural*, 40(11), 2411-2418. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782010001100028>

Walter, L. C., Streck, N. A., Rosa, H. T., Ferraz, S. E. T., & Cera, J. C. (2014). Mudanças climáticas e seus efeitos no rendimento de arroz irrigado no Rio Grande do Sul. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 49(12), 915-924. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2014001200001>

Wang, L., Deng, F., & Ren, W. J. (2015). Shading tolerance in rice is related to better light harvesting and use efficiency and grain filling rate during grain filling period. *Field Crops Research*, 180, 54-62. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.05.010>

Wang, L., Deng, F., Ren, WJ., & Yang, WY. (2013). Effects of shading on starch pasting characteristics of indica hybrid rice (*Oryza sativa* L.). *PLOS one*. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0068220>

Wu, L., Zhang, W., et al. (2017). Shading contributes to the reduction of stem mechanical strength by decreasing cell wall synthesis in japonica rice (*Oryza sativa* L.). *Frontiers in Plant Science*, 8, 881. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00881>

Yang, L., & Wang, Y. (2019). Impact of climate change on rice grain quality. *Rice: Chemistry and Technology*, 427-441. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811508-4.00013-7>

Yao, F., Xu, Y., Lin, E., Yokozawa, M., & Zhang, J. (2007). Assessing the impacts of climate change on rice yields in the main rice areas of China. *Climatic Change*, 80(3), 395-409. DOI 10.1007/s10584-006-9122-6.

Yoshida, S. (1981). *Fundamentals of rice crop science*. Los Baños, Philippines: International Rice Research Institute.

Yoshida, S., & Parao, FT. (1976). Climatic influence on yield and yield components of lowland rice in the tropics. *Climate and rice*, 20, 471-494. Los Baños, Philippines: International Rice Research Institute.

Yuan, S. (2021). A roadmap towards sustainable intensification for a larger global rice bowl. *Nature*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-401904/v1>

Zanon, A. J., Streck, N. A., & Grassini, P. (2016). Climate and management factors influence soybean yield potential in a subtropical environment. *Agronomy Journal*, 108, 1447–1454. <https://doi.org/10.2134/agronj2015.0535>

Zubair, L. (2002). El Nino–southern oscillation influences on rice production in Sri Lanka. *International Journal of Climatology*, 22(2), 249-260. <https://doi.org/10.1002/joc.714>.