

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

Thiago Schmitz Marques da Rocha

**POTENCIAL E LACUNAS DE PRODUTIVIDADE DA SOJA
CULTIVADA EM ROTAÇÃO COM ARROZ IRRIGADO**

Santa Maria, RS
2020

Thiago Schmitz Marques da Rocha

**POTENCIAL E LACUNAS DE PRODUTIVIDADE DA SOJA
CULTIVADA EM ROTAÇÃO COM ARROZ IRRIGADO**

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Área de Concentração em Engenharia de Água e Solo da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Doutor em Engenharia Agrícola**.

Orientador: Prof. Dr. Nereu Augusto Streck

Santa Maria, RS
2020

Marques da Rocha, Thiago Schmitz
POTENCIAL E LACUNAS DE PRODUTIVIDADE DA SOJA
CULTIVADA EM ROTAÇÃO COM ARROZ IRRIGADO / Thiago Schmitz
Marques da Rocha.- 2020.
80 f.; 30 cm

Orientador: Nereu Augusto Streck
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós
Graduação em Engenharia Agrícola, RS, 2020

1. Glycine max (L.) Merrill 2. terras baixas 3.
modelos agrícolas 4. zonas climáticas I. Streck, Nereu
Augusto II. 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.

©2020

Todos os direitos autorais reservados a Thiago Schmitz Marques da Rocha. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

Contatos: (55) 99951-6272; thiagosmr@msn.com

Thiago Schmitz Marques da Rocha

**POTENCIAL E LACUNAS DE PRODUTIVIDADE DA SOJA
CULTIVADA EM ROTAÇÃO COM ARROZ IRRIGADO**

Tese apresentada ao Curso de Pós- Graduação em Engenharia Agrícola, Área de Concentração em Engenharia de Água e Solo da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Doutor em Engenharia Agrícola**.

Aprovada em 30 de outubro de 2020:

Nereu Augusto Streck, PhD. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Alencar Junior Zanon, Dr. (UFSM)

Mirta Teresinha Petry, Dra. (UFSM)

Christian Bredemeier, PhD. (UFRGS)

Mateus Possebon Bortoluzzi, Dr. (UPF)

Santa Maria, RS
2020

DEDICATÓRIA

*Dedico esse trabalho aos meus avós, Professora Lori da Silva Schmitz, Professor
Cyro Melo Schmitz, Professora Aury Rodrigues da Rocha e Professor Clandio Marques da
Rocha, que fazem da educação o grande legado familiar.*

AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores Professor Nereu Augusto Streck e Professor Alencar Junior Zanon, Universidade Federal de Santa Maria, Capes, CNPq, Instituto Rio Grandense do Arroz, Eduardo Lago Tagliapietra, Darlan Balest e Simone Puntel representando toda equipe Field Crops distribuída ao redor do mundo e a toda minha família, em especial, minha noiva, Maritiele Naissinger da Silva, parceira e incentivadora desta jornada.

MUITO OBRIGADO.

*“Eu sou parte de uma equipe.
Então, quando venço, não sou eu apenas quem vence.
De certa forma termino o trabalho de um grupo enorme de pessoas!”
(Ayrton Senna)*

RESUMO

Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola
Universidade Federal de Santa Maria

POTENCIAL E LACUNAS DE PRODUTIVIDADE DA SOJA CULTIVADA EM ROTAÇÃO COM ARROZ IRRIGADO

AUTOR: Thiago Schmitz Marques da Rocha
ORIENTADOR: Nereu Augusto Streck

A crescente demanda por alimentos no mundo apresenta como principal alternativa a necessidade de aumentar a produtividade das culturas agrícolas, onde a cultura da soja (*Glycine max* (L.) Merrill), surge com papel central. Conhecer as produtividades potenciais, lacunas de produtividade e causas da perda de produtividade permite direcionar ações de agricultores, extensionistas, técnicos e pesquisa. No estado do Rio Grande do Sul, a expansão da cultura vem ocorrendo na metade sul do estado, região tradicionalmente produtora de arroz irrigado apresentando características de solo e de manejo bastante distintas da região tradicionalmente produtora. O objetivo deste trabalho foi determinar o potencial e as lacunas de produtividade da cultura da soja cultivada em rotação com o arroz irrigado. Produtividades potenciais foram estimadas por modelo matemático, produtividades atingíveis experimentalmente foram definidas por uma rede de experimentos conduzidas nos últimos anos e um levantamento de dados de lavouras de produtores permitiram definir potenciais, lacunas existentes e possíveis causas de perda de produtividade nesse importante ambiente de produção agrícola do país.

Palavras-chave: *Glycine max* (L.) Merrill, terras baixas, modelos agrícolas, zonas climáticas

ABSTRACT

Postgraduate Program in Agricultural Engineering
Federal University of Santa Maria

POTENTIAL AND YIELD GAP IN SOYBEAN IN ROTATION WITH FLOATED RICE

AUTHOR: Thiago Schmitz Marques da Rocha
ADVISOR: Nereu Augusto Streck

The growing demand for food in the world presents as the main alternative the need to increase the productivity of agricultural crops, where the soybean crop (*Glycine max* (L.) Merrill), has a central role. Knowing the potential productivities, productivity gaps and causes of lost productivity allows directing actions by farmers, extension workers, technicians and research. In the state of Rio Grande do Sul, the expansion of the crop has been taking place in the southern half of the state, a region traditionally producing irrigated rice with characteristics of soil and management quite different from the northern half of the state. The objective of this project was to determine the potential and productivity gaps of soybean cultivated in rotation with irrigated rice. Potential yields were estimated by mathematical model, experimentally achievable yields were defined by a network of experiments conducted in recent years and a survey of data from farmers' crops allowed to define potentials, existing gaps and possible causes of lost productivity in this important agricultural production environment from the country.

Keywords: *Glycine max* (L.) Merrill. Lowlands. Crop models. Climate zones.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

DESENVOLVIMENTO

- Figura 1** Distribuição de Planossolos (A) e Chernossolos (B), classes de solos predominantes onde ocorre o cultivo de soja em rotação com arroz irrigado no Rio Grande do Sul, Brasil..... 17
- Figura 2** Níveis de produtividades (Potencial, Boudary Function Experimental, Boundary Function das lavouras acompanhadas e produtividade média) para a soja em rotação com o arroz irrigado em função da data de semeadura a partir do dia 20 de Setembro no estado do Rio Grande do Sul... 60

MANUSCRITO 1

- Figura 1** Municípios onde foram conduzidos experimentos com a cultura da soja em rotação com arroz irrigado em seis anos agrícolas (2014-2020) na metade sul do Rio Grande do Sul, Brasil..... 25
- Figura 2** Média das produtividades de soja em rotação com arroz irrigado em cada ambiente determinado pela combinação: local, data de semeadura e ocorrência ou não de irrigação suplementar. 2014-2020, Rio Grande do Sul, Brasil..... 27
- Figura 3** Relação entre produtividade e data de semeadura (dias após 20 de Setembro) para experimentos de soja cultivada em rotação com arroz irrigado. Caracterizando produtividades com (círculos azuis) e sem irrigação suplementar (círculos amarelos) (A) e diferentes faixas de GMR (B), em três anos agrícolas. A linha sólida mostra a função limite superior (boundary function) para o período. Rio Grande do Sul, Brasil..... 29
- Figura 4** Relação entre produtividade e data de semeadura (dias após 20 de Setembro) para experimentos de soja cultivada em rotação com arroz irrigado. Em roxo (A) cultivares com Grupo de Maturidade Relativa (GMR) <6.0 , em laranja (B) $6.0 < GMR < 7.0$ e cinza (C) $GMR > 7.0$. As linhas sólidas mostram as funções limite superior (boundary function) para o período e a área vermelha representa o período onde as maiores produtividades são obtidas dentro de cada faixa de GMR..... 31
- Figura 5** Produtividade média de soja com diferentes faixas de grupos de maturidade relativa (GMR) cultivada em rotação com arroz irrigado em ambiente de menor potencial de produtividade (eixo X) e ambientes de maior potencial de produtividade (eixo Y). Rio Grande do Sul, Brasil (2014-2020)..... 32
- Figura 6** Relação entre produtividade e suprimento hídrico em mm ao longo do período da semeadura (Sem) até R7 para experimentos de soja cultivada em rotação com arroz irrigado. Caracterizando produtividades com (círculos azuis) e sem irrigação suplementar (círculos amarelos). A linha sólida mostra a função limite superior (boundary function) para o período e as linhas vermelhas tracejadas representam as lineares para os momentos de

	crescimento, platô e queda nas produtividades. Rio Grande do Sul, Brasil (2014-2020).....	33
Figura 7	Relação entre a produtividade e o coeficiente fototérmico (Q) entre R3 e R7 de cultivada em rotação com arroz irrigado. Rio Grande do Sul, Brasil (2014-2020).....	34
 MANUSCRITO 2		
Figura 11	Divisão da metade sul do Rio Grande do Sul em regiões climáticas, seguindo os critérios: (A) acúmulo de graus dias anual, (B) índice de aridez (precipitação/evapotranspiração), (C) sazonalidade de temperatura e (D) representa as 11 regiões climáticas presentes na metade sul do Rio Grande do Sul – Brasil.....	39
Figura 2	Mapa de colheita de soja em rotação com arroz irrigado na metade sul do Rio Grande do Sul, com base nos dados municipais disponíveis do IRGA para o período (2015-2020).....	40
Figura 3	Regiões climáticas representativas das áreas cultivadas com soja em rotação com arroz irrigado na metade sul do Rio Grande do Sul – Brasil....	41
Figura 4	Buffer zones representativas da área produtiva de soja em rotação com arroz irrigado na metade sul do Rio Grande do Sul.....	42
Figura 5	Dados meteorológicos médios (2004 – 2019), (A) Temperatura média (°C), (B) radiação solar (MJ dia ⁻¹), (C) coeficiente fototérmico (MJ dia ⁻¹ °C ⁻¹), (D) precipitação (mm) para o período de dezembro – março, com exceção do coeficiente fototérmico (R1 até R7), nas diferentes buffers zones do Rio Grande do Sul.....	43
Figura 6	Mapa do Rio Grande do Sul com a localização dos questionários aplicados em lavouras comerciais de produtores em quatro anos agrícolas (2015-2019).....	45
Figura 7	Produtividades das lavouras de soja em rotação com arroz irrigado que compõem o banco de dados divididas e média da série histórica do IRGA (2009-2020).....	47
Figura 8	(A) Potencial de produtividade (PP) (2004-2019), (B) Produtividade potencial limitada por água (PPA) (2004-2019) e (C) Produtividade média (2009-2020) nas diferentes buffers zones da região produtora de soja em rotação com arroz irrigado na metade sul do Rio Grande do Sul.....	49
Figura 9	(A) Lacuna de produtividade total (%LPt), (B) Lacuna de produtividade causada pelo déficit hídrico (%LPw) e (C) lacuna de produtividade manejo (LPm) nas diferentes buffers zones na metade sul do Rio Grande do Sul....	50

Figura 10	Potenciais de produtividade de soja em rotação com arroz irrigado no Rio Grande do Sul – Brasil. Coluna preta é o potencial de produtividade estimado pelo modelo (PP), coluna amarela é o potencial de produtividade por experimentos (PPE), coluna verde é o potencial de produtividade pelos melhores produtores (PPP), coluna azul é o potencial limitado por água (PPA) estimado pelo modelo e a coluna cinza produtividade média (PM) do RS nos últimos 11 anos (2009 – 2020).....	51
------------------	--	-----------

Figura 11	Modelo de árvore de regressão mostrando fontes de variação na produtividade de grãos devido aos fatores biofísicos e de manejo. Caixas são nós de divisão, com caixas inferiores representando nós de terminal. Os valores dentro de cada nó terminal indicam a média da produção de grãos (em kg ha ⁻¹) com base em 13% de umidade e a porcentagem de observações em cada nó terminal.....	55
------------------	---	-----------

ANEXOS

Figura 8	Precipitação pluvial (mm) e temperatura média do ar (°C) para os anos agrícolas 2014/2015 e 2016/2017. Cachoeirinha, Rio Grande do Sul. Brasil.....	66
-----------------	---	-----------

Figura 9	Precipitação pluvial (mm) e temperatura média do ar (°C) para os anos agrícolas 2014/2015, 2017/2018 e 2018/2019. Itaqui, Rio Grande do Sul. Brasil.....	67
-----------------	--	-----------

Figura 10	Precipitação pluvial (mm) e temperatura média do ar (°C) para os anos agrícolas 2017/2018 e 2018/2019. Santa Maria, Rio Grande do Sul. Brasil.....	68
------------------	--	-----------

Figura 11	Precipitação pluvial (mm) e temperatura média do ar (°C) para os anos agrícolas 2014/2015, 2018/2019 e 2019/2020. Uruguaiana, Rio Grande do Sul. Brasil.....	69
------------------	--	-----------

Figura 12	Precipitação pluvial (mm) e temperatura média do ar (°C) para os anos agrícolas 2014/2015 e 2015/2016. Santa Vitória do Palmar, Rio Grande do Sul. Brasil.....	70
------------------	--	-----------

LISTA DE TABELAS

MANUSCRITO 1

Tabela 1	Locais, número de datas de semeadura, número de cultivares, variação de grupos de maturidade relativa, ocorrência ou não de irrigação suplementar e produtividades médias, mínimas e máximas dos experimentos que compõe o banco de dados de soja cultivada em rotação com arroz irrigado na metade sul do Rio Grande do Sul, Brasil.....	26
-----------------	---	-----------

MANUSCRITO 2

Tabela 1	Caracterização das variáveis utilizadas para simulação do potencial de produtividade e potencial de produtividade limitado por água de soja em rotação com arroz irrigado nas buffers zones da metade sul do Rio Grande do Sul – Brasil.....	44
Tabela 2	Dados coletados em lavouras de produtores de soja em rotação com arroz irrigado no Rio Grande do Sul durante quatro anos agrícolas (2015 – 2019).....	46
Tabela 3	Variáveis que explicam as lacunas de produtividades das lavouras de soja em rotação com arroz irrigado no Rio Grande do Sul. AP = altas produtividades (tercil superior das produtividades), BP = baixas produtividades (tercil inferior produtividades) e n = número de questionários analisados.....	54

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 OBJETIVOS	16
2.1 OBJETIVO GERAL	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3 DESENVOLVIMENTO	17
3.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1.1 Soja em rotação com arroz irrigado no estado do Rio Grande do Sul.....	17
3.1.2 Grupo de maturidade relativa e época de semeadura	18
3.1.3 Potencial de produtividade e potencial de produtividade limitada por água	20
3.1.4 Modelos de simulação do crescimento, desenvolvimento e produtividade da soja..	21
3.2 MANUSCRITO 1	23
3.3 MANUSCRITO 2	36
3.4 DISCUSSÃO	59
4 CONCLUSÃO	61
REFERÊNCIAS.....	62
ANEXOS	66
ANEXO 1	66
ANEXO 2	71

1 INTRODUÇÃO

A cultura da soja é a principal "commodity" agrícola do Brasil, sendo o maior produtor mundial do grão (USDA, 2020). No Rio Grande do Sul a área cultivada com soja foi de aproximadamente 6,6 milhões de hectares no ano agrícola 2019/2020 (CONAB, 2020). Estima-se que, na metade Sul do estado foram cultivados na safra 2019/2020 em torno de 2,2 milhões de hectares com soja e, desse total, aproximadamente 340 mil foram semeados em rotação com arroz irrigado (IRGA, 2020).

O principal fator que promoveu o aumento do cultivo da soja em áreas tradicionalmente cultivadas com arroz irrigado, em monocultura, no RS, foi o surgimento de plantas daninhas resistentes aos herbicidas do grupo das imidazolinonas, principalmente o arroz daninho (AGOSTINETTO et al., 2001; VILLA et al., 2006), inviabilizando técnica e economicamente o cultivo de arroz em muitas lavouras.

Apesar do contínuo aumento na produtividade da soja nos últimos anos no RS, ainda há uma considerável diferença entre as produtividades medidas em experimentos de estações experimentais e das produtividades médias atuais no RS, principalmente nestas regiões de terras baixas onde ocorre o cultivo em rotação com o arroz irrigado.

A definição de potenciais de produtividade e das lacunas existentes entre os potenciais e os diferentes níveis de produtividade (experimental, melhores produtores e média de determinada região) permite conhecer a capacidade produtiva de um sistema e auxiliar na identificação dos fatores que causam as lacunas existentes (LOBELL et al., 2009).

Estudos sobre lacuna de produtividade vêm aumentando nos últimos anos, motivados pela crescente demanda mundial de alimentos e de energia para atender ao aumento populacional e de renda em muitos países (FERMONT et al., 2009; GRASSINI et al., 2015).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Estimar o potencial e as lacunas de produtividade da cultura da soja cultivada em rotação com o arroz irrigado.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Quantificar fatores ambientais e genéticos que possibilitam e que limitam altas produtividades da soja em rotação com arroz irrigado.
- Identificar fatores que potencialmente explicam a lacuna de produtividade nas lavouras de soja em rotação com arroz irrigado do Estado do Rio Grande do Sul.

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1.1 Soja em rotação com arroz irrigado no estado do Rio Grande do Sul

Os primeiros relatos dos benefícios de rotação de culturas são bíblicos, remetendo as práticas agrícolas que ocorriam na margem do rio Nilo no antigo Egito. Gregos e romanos conheciam e relatavam os benefícios de intercalar culturas agrícolas safra após safra. No Rio Grande do Sul alternativas para cultivar soja em áreas de monocultivo de arroz foram estudadas nas décadas de 30 e 40 (BERNARDES, 1945), porém somente após o século XXI é que o sistema de rotação com arroz e soja ganhou expressividade de área no estado.

O arroz irrigado é cultivado na região conhecida como metade sul do Rio Grande do Sul. Os solos onde ocorre o predomínio do cultivo correspondem a classe de Planossolos (56%) e Chernossolos (16%) (Figura 1).

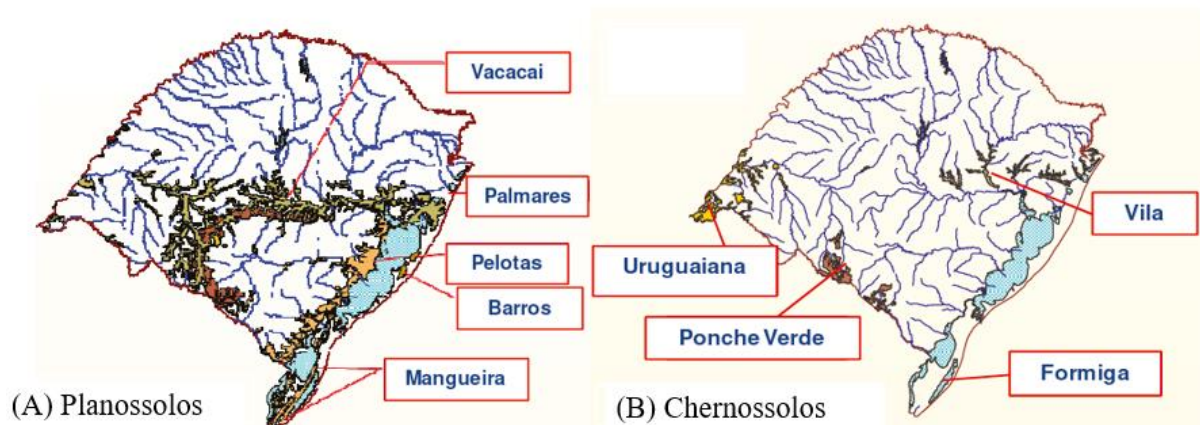


Figura 2 – Distribuição de Planossolos (A) e Chernossolos (B), classes de solos predominantes onde ocorre o cultivo de soja em rotação com arroz irrigado no Rio Grande do Sul, Brasil. Fonte: Adaptado de IRGA (2018).

Além de Planossolos e Chernossolos o arroz irrigado também é cultivado em Gleissolos, Neossolos, Plintossolos, Vertissolos e associações entre essas classes (Pinto et al., 2004). A distribuição geográfica desses solos varia na região orizícola do estado do Rio Grande do Sul e algumas classes se apresentam mais ou menos aptas ao cultivo de soja, porém o cultivo já ocorre em todas as regiões e classes de solo. A característica de hidromorfismo é comum a todas essas áreas e um dos principais desafios ao cultivo de culturas de sequeiro nesses ambientes (BORGES et al., 2004; STRECK et al., 2008a).

A presença de camada compactada também é recorrente nessas áreas e ocorre pelas consecutivas gradagens e preparos de solo realizados ao longo dos anos nas lavouras orízícolas, essa camada é caracterizada pela alta densidade, baixa macroporosidade e alta resistência à penetração (MENTGES et al., 2013). Além dessa camada compactada, a primeira camada onde ocorre a exploração do sistema radicular também apresenta limitações físicas como a desestruturação de agregados e porosidade reduzida. Esses fatores favorecem tanto a ocorrência de déficit como excesso hídrico (MARCHESAN et al., 2001).

Uma alternativa para minimizar o estresse por déficit hídrico nessas áreas é a utilização de irrigações por “banhos”, aproveitando toda a estrutura de irrigação (barragens, canais de irrigação, bombas e operadores) existente do cultivo do arroz irrigado. Esses banhos são mais eficientes se a área apresenta algum gradiente de declividade e um adequado sistema de drenagem auxiliando com que toda a área seja irrigada e não ocorram acúmulos que possam vir a causar estresse por excesso hídrico à cultura (MARCOLIN et al., 2011).

Para minimizar os prejuízos por excesso hídrico, melhorias na drenagem, escolha de cultivares adaptadas em áreas de maior risco e utilização de mecanismos rompedores da camada compactada podem auxiliar no processo de produção (MARQUES da ROCHA et al., 2017; SARTORI et al., 2016).

3.1.2 Grupo de maturidade relativa e época de semeadura

Grupo de maturidade relativa (GMR) corresponde a duração do ciclo de desenvolvimento da cultura, desde a semeadura até o ponto de colheita (R8) (ALLIPRANDINI et al., 2009). A época de semeadura e grupo de maturidade relativa são responsáveis pelas condições meteorológicas que coincidem em cada estágio de desenvolvimento da cultura. Para altas produtividades é imprescindível que os estágios mais críticos coincidam com as condições de ambiente mais favoráveis (temperatura, radiação solar), minimizando a ocorrência de estresses (KANTOLIC et al., 2008; MARTIGNONE et al., 2006). A deficiência hídrica é o principal fator que limita as elevadas produtividades de soja, sendo que a intensidade de redução do rendimento depende da fase do desenvolvimento da cultura e da duração do estresse hídrico (CUNHA et al., 2001).

Na cultura da soja os períodos mais sensíveis à deficiência hídrica são: germinação-emergência, florescimento e enchimento de grãos (FARIAS et al., 2009; MARCHEZAN, 1982). Sendo assim, a distribuição uniforme das chuvas durante as fases de maior demanda de

água (floração) e mais críticas à ocorrência de déficits hídricos (enchimento de grãos) determinam a variabilidade no rendimento de grãos (FARIAS et al., 2009). A ótima disponibilidade de recursos ambientais está associada a época de semeadura, assim a diferença de produtividade entre épocas de semeaduras de maiores produtividades e épocas mais utilizadas pelos produtores pode ser definida como uma lacuna ambiental.

A data de semeadura estabelece o limite superior do potencial de produtividade da soja. A perfeita interação entre os fatores clima, manejo e genética permite o alcance do potencial produtivo. Estudos realizados em diferentes ambientes demonstram que 80% da variação na produtividade são causadas, em geral, pelo ambiente, enquanto apenas 20% da variação ocorrem em virtude dos efeitos de genótipo e da interação genótipo x ambiente (ASFAW et al., 2009; YAN, 2001).

Grassini et al. (2015b) analisaram o potencial de produtividade em função da época de semeadura e constataram uma perda de 32 a 53 Kg ha⁻¹ dia⁻¹ de atraso na época de semeadura para regiões produtoras dos EUA. Zanon et al. (2016), para ambiente subtropical, identificaram uma perda de 26 Kg ha⁻¹ dia⁻¹ de produtividade em semeaduras após o dia 4 de novembro. Ainda que estes estudos indiquem valores de perdas de produtividade essas taxas não são fixas, pois a variabilidade climática é particular para regiões e anos agrícolas.

A variabilidade na produção também pode ser associada à interação entre a data da semeadura e o grupo de maturidade. Grassini et al. (2015b) não encontraram interação entre GMR e data de semeaduras precoces, possivelmente pela coincidência de uma faixa de melhor disponibilidade climática nos estágios críticos da cultura independente do GMR. Já para semeaduras tardias essa interação foi significativa, pois GMR baixos semeados em períodos de decréscimo do fotoperíodo tendem a encurtar o ciclo e conseqüentemente reduzem a produtividade.

Para maximizar o rendimento e minimizar os danos por estresses ambientais, os produtores deve conhecer a interação entre GMR e época de semeadura para a sua latitude. Uma afirmação consistente na maioria dos trabalhos publicados é que semeaduras precoces com GMR baixos para cada faixa de latitude maximizam as produtividades. Zdziarski et al., (2018) indicaram os GMR entre 5.3 e 5.7 para atingir altas produtividades no RS e para altitudes mais baixas (temperaturas mais altas) é necessário utilizar GMR maiores (próximo de 5.7). Resultados similares obtidos por Zanon et al. (2016), para o RS, indicam que uma combinação de GMR entre menores e intermediários com semeadura antecipada tem-se o maior potencial de produtividades, principalmente em resposta do quociente fototérmico desse grupo de

cultivares de menores GMR.

3.1.3 Potencial de produtividade e potencial de produtividade limitada por água

A produtividade potencial é a produtividade de uma cultura quando esta não sofre limitações de água, nutrientes e estresses abióticos (VAN ITTERSUM; RABBINGE, 1997). Quando a produtividade potencial é expressada, os fatores que determinam o desenvolvimento são apenas a radiação solar, temperatura, CO₂ atmosférico e as características genéticas da cultivar.

A produtividade potencial é restrita ao local de estudo por causa do clima, mas em teoria não depende de propriedades do solo, assumindo que a disponibilidade necessária de água e nutrientes pode ser manejada, o que não é prático ou economicamente viável em casos onde o solo apresenta restrições, como barreiras físicas para o aprofundamento radicular (VAN ITTERSUM et al., 2013).

Para determinar o potencial de produtividade, além de dados de experimentos de campo e lavouras em condições ideais, pode-se utilizar modelos matemáticos que descrevam a produtividade em função das condições meteorológicas as quais as plantas são submetidas e este sendo previamente testado para determinada região de estudo (VAN ITTERSUM et al., 2013).

A definição da produtividade potencial limitada por água é semelhante a produtividade potencial, mas o crescimento da cultura é limitado pelo fornecimento de água, e, conseqüentemente, influenciado pelo tipo de solo (capacidade de retenção de água e profundidade de enraizamento), o que na prática acontece no Estado do Rio Grande do Sul, principalmente na metade Sul. A produtividade potencial limitada por água representa a condição mais expressiva para a caracterização no Estado do Rio Grande do Sul. Para as culturas irrigadas, tanto o potencial de produtividade como o potencial de produtividade limitada por água podem servir de referência para determinar o potencial da cultura em determinada região (VAN ITTERSUM et al., 2013).

A metodologia para determinar tanto as produtividades potenciais é baseada nas épocas de semeadura ideal, na densidade de plantio e nas cultivares recomendadas para determinada região e utilizadas pelos produtores (GRASSINI et al., 2011). Em condições onde a realidade da maior parte dos produtores compreende alguma exceção as condições ideais de manejo e data de semeadura deve-se levar em consideração essas modificações para a determinação dos

potenciais de produtividade (VAN ITTERSUM et al., 2013). Esse tipo de situação é comumente observada na metade sul do Estado onde muitas vezes por uma estreita janela de semeadura e a capacidade operacional estar ligada a cultura do arroz irrigado, ocorrem modificações na janela de cultivo da cultura da soja.

3.1.4 Modelos de simulação do crescimento, desenvolvimento e produtividade da soja

Modelos matemáticos são ferramentas úteis para caracterizar e simular o crescimento, desenvolvimento e produtividade das culturas agrícolas (STRECK et al., 2008). A caracterização do desenvolvimento das culturas é importante, pois a partição dos fotoassimilados para diferentes órgãos da planta é dependente do estágio de desenvolvimento. Algumas práticas de manejo são mais eficientes se realizadas em determinados estágios do desenvolvimento (STRECK et al., 2003). Modelos de desenvolvimento bem calibrados e testados em diferentes cultivares permitem projetar a data do calendário de ocorrência dos estádios chave visando maximizar a capacidade de trabalho e equipamento para as operações de campo, como aplicação de fungicidas e inseticidas que apresentam estádios exatos de máxima eficiência (SETIYONO et al., 2007).

Os modelos agrícolas podem ser divididos em dois grupos: modelos empíricos/estatísticos e modelos dinâmicos mecanísticos. Os modelos agrícolas empíricos/estatísticos geralmente são obtidos através de técnicas de regressão linear ou múltipla e estabelecem uma relação entre o rendimento da cultura e os fatores que o afetam (clima, pragas), incluindo análise de probabilidades (SILVA; BERGAMASCO, 2001). Modelos dinâmicos mecanísticos são baseados em processos e as equações matemáticas envolvidas descrevem processos ecofisiológicos da planta ao longo do tempo (STRECK et al., 2013).

No caso da cultura da soja, diversos modelos simulam mudanças físicas, químicas e processos biológicos na planta em função da disponibilidade dos elementos meteorológicos, tipos de solo e manejo da cultura (VERA-DIAZ, 2008). Alguns dos modelos de simulação da cultura da soja incluem: o modelo SOYBEAN (SINCLAIR, 1986), o modelo CSM-CROPGRO-Soybean (BOOTE et al., 1998), e os modelos SoyDev e SoySim (SETIYONO et al., 2007; 2010). Modelos tem sido muito usado como ferramentas na simulação da produtividade potencial de soja e para identificar os fatores limitantes da produtividade (BATTISTI; SENTELHAS, 2015, 2017, 2018; DA SILVA ANDREA et al., 2019; TEIXEIRA et al. 2019) e em cenários climáticos futuros (CERA et al., 2017b; MALL et al., 2004; QIAN

et al., 2011).

Entre os modelos ecofisiológicos para a cultura da soja, um dos principais é o modelo CSM-CROPGRO-Soybean é um modelo baseado em processos e desenvolvido para simular o crescimento, desenvolvimento e produtividade de soja (BOOTE et al., 2002; JONES et al. 2003). Esse modelo é o mais usado ao redor do mundo e é o modelo de soja na plataforma DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) (HOOGENBOOM et al., 2004). A plataforma DSSAT, (JONES et al., 2003) destaca-se como uma das principais plataformas de modelagem de culturas agrícola, incluindo modelos de simulação de mais de 28 culturas, em uso no Brasil e no mundo (BATTISTI et al. 2018; CERA et al., 2017a; EDREIRA et al, 2017; FENSTERSEIFER et al, 2017; GUILPART et al, 2017; GRASSINI et al, 2015b; MERLOS et al, 2015). O DSSAT simula o crescimento, desenvolvimento e produtividade das culturas, considerando o crescimento em uma área uniforme sob condições prescritas ou simuladas de manejo, assim como os ciclos da água, do carbono e do nitrogênio no sistema solo-planta-atmosfera que ocorrem sob o sistema de cultivo ao longo do tempo.

O modelo permite a simulação dos principais processos fisiológicos e ecofisiológicos da cultura, tais como fotossíntese, respiração, acumulação e partição da biomassa, fenologia, crescimento foliar, de caules e de raízes, extração de água do solo, evapotranspiração e produtividade da soja, respondendo à variação dos dados meteorológicos, condições de manejo e solo. O modelo CSM-CROPGRO-Soybean apresenta a vantagem de simulação sem e com restrição hídrica para descrever o crescimento e desenvolvimento, que permite simular o PP e PPA. Esses modelos apresentam alta aplicabilidade em estudos de potencial de produtividade e relações dos processos condicionantes da produtividade pelo alto nível de descrição e detalhes nos dados que modulam o modelo. No entanto, esses modelos que requerem altas variáveis de entrada têm baixa aplicabilidade e adesão por produtores e extensionista por se tornarem complexos e de difícil manipulação, por exigirem alto conhecimento de informática e informações detalhadas.

3.2 MANUSCRITO 1

SOJA EM ROTAÇÃO COM ARROZ IRRIGADO: MINIMIZAR RISCOS OU BUSCAR O POTENCIAL PRODUTIVO?

RESUMO

A rotação com soja em áreas tipicamente cultivadas com arroz irrigado é fundamental para viabilizar a produção sustentável em muitas dessas lavouras. Produtividades elevadas de soja nesses ambientes vem sendo observadas nos últimos anos, mas características de solo e relevo muitas vezes limitam a produtividade e causam perdas, principalmente por excesso e déficit hídrico. O objetivo deste trabalho foi quantificar fatores ambientais e genéticos que possibilitam e que limitam altas produtividades da soja em rotação com arroz irrigado. Experimentos de campo foram realizados ao longo de seis anos agrícolas, nas principais regiões produtoras de arroz irrigado do estado do Rio Grande do Sul. As produtividades atingíveis de soja em rotação com arroz irrigado são tão elevadas quanto aquelas atingíveis em áreas de terras altas, mas o período de semeadura que permite as maiores produtividades é reduzido em relação ao que ocorre em áreas de terras altas para latitudes similares. A antecipação de semeadura permite atingir potenciais mais elevados, porém semeaduras anteriores a 20 de outubro reduzem o potencial e aumentam os riscos.

Palavras-chave: Época de semeadura; Excesso hídrico; Terras baixas.

1 INTRODUÇÃO

A rotação com soja já faz parte do sistema de produção de arroz irrigado no Rio Grande do Sul, atualmente são cultivados 340 mil hectares de soja nesse sistema (IRGA, 2020). Foi necessário buscar uma alternativa de cultivo que possibilitasse o melhor manejo de plantas daninhas resistentes que infestavam grande parte das lavouras arroyeiras e que garantisse rentabilidade e sustentabilidade ao sistema onde predominava o monocultivo de arroz irrigado.

Na última década houve uma força tarefa da pesquisa e extensão para trazer a soja, um cultivo tipicamente de sequeiro para áreas de terras baixas onde a característica de hidromorfismo e limitações físicas do solo são marcantes (MARQUES DA ROCHA, et al., 2018). Em função dessas dificuldades torna-se recorrente em todas as safras perdas de produtividade de soja por excesso e/ou o déficit hídrico (BORTOLUZZI, et al., 2016; BORTOLUZZI et al., 2020), e em casos mais extremos lavouras inteiras de soja são perdidas

nesse ambiente, porém mesmo nesses anos onde as perdas são recorrentes, altas produtividades também são atingidas (CESB, 2020).

Recomendações específicas que possibilitem aumentos das produtividades, mas que também reduzam os riscos específicos são fundamentais para esse importante sistema de produção. Datas de semeadura entre 20 de setembro e 4 de novembro possibilitam atingir o potencial de produtividade de soja para o estado do Rio Grande do Sul, em função do melhor aproveitamento das condições de temperatura e radiação solar ao longo do ciclo de desenvolvimento da soja (ZANON et al., 2016). Semeaduras de outubro apresentam elevado risco de ocorrência de excesso hídrico no período inicial de desenvolvimento da cultura em planossolos (BORTOLUZZI et al, 2016), os quais representam a maior porcentagem da área cultivada de soja em rotação com arroz irrigado no Rio Grande do Sul (PINTO et al., 2004).

As cultivares de soja utilizadas nesse sistema de produção, são em geral as mesmas comercializadas no restante do estado do Rio Grande do Sul. Características de rusticidade, estabilidade produtiva e tolerância a períodos maiores de excessos hídricos são preconizadas nesse ambiente para minimizar perdas, porém em condições de maior potencial de produtividade essas matérias nem sempre apresentam a melhor performance produtiva.

O objetivo deste trabalho foi quantificar fatores ambientais e genéticos que possibilitam e que limitam altas produtividades da soja em rotação com arroz irrigado.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 EXPERIMENTOS DE CAMPO

Ao longo de seis anos agrícolas (2014-2020) foram conduzidos experimentos com a cultura da soja em rotação com o arroz irrigado no Rio Grande do Sul em 6 municípios que representam a variabilidade de ambientes nesse sistema de produção (Figura 1).

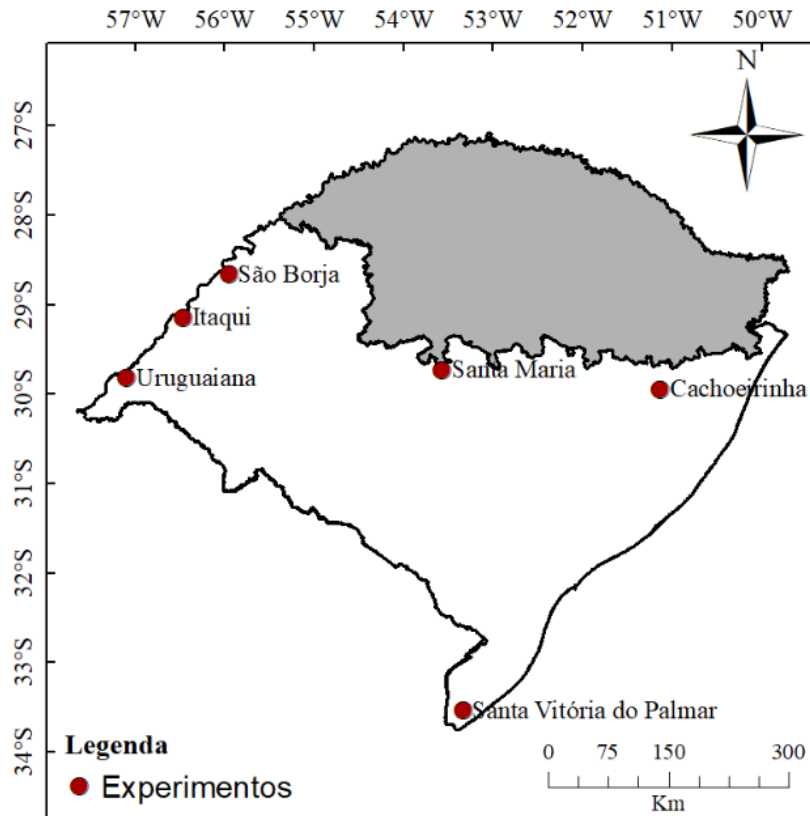


Figura 1 - Municípios onde foram conduzidos experimentos com a cultura da soja em rotação com arroz irrigado em seis anos agrícolas (2014-2020) na metade sul do Rio Grande do Sul, Brasil.

As áreas são tradicionalmente cultivadas com arroz irrigado, os solos são planossolos, gleissolos, neossolos e associações (STRECK et al., 2008). As datas de semeadura compreendem todo o período em que as condições de temperatura do solo e do ar permitem o cultivo de soja na região (FARIAS et al, 2005). O clima destes locais, pela classificação de Köppen, é Cfa (Subtropical) (KUINCHTNER; BURIOL, 2001). As cultivares utilizadas representam toda a variabilidade disponível no mercado do estado do Rio Grande do Sul, com toda a faixa de GMR, biotecnologia, tipo de crescimento e empresas de origem disponíveis (Tabela 1).

Tabela 1 - Locais, número de datas de semeadura, número de cultivares, variação de grupos de maturidade relativa, ocorrência ou não de irrigação suplementar e produtividades médias, mínimas e máximas dos experimentos que compõe o banco de dados de soja cultivada em rotação com arroz irrigado na metade sul do Rio Grande do Sul, Brasil.

Locais	Ano Agrícola	Datas de semeadura	Cultivares	Número de GMR (faixa)	Irrigação Suplementar	Prod. média (máx - mín) Mg ha ⁻¹
Cachoeirinha	2014/15	3	7	7 (4,8 - 8,2)	Irrigado	4,39 (5,30 - 2,81)
	2016/17	2	7	7 (4,8 - 8,0)	Irrigado	3,13 (4,10 - 1,04)
Itaqui	2014/15	2	5	5 (4,8 - 8,2)	Irrigado	1,71 (2,18 - 1,30)
	2017/18	3	5	5 (4,8 - 7,8)	Irrigado	1,38 (2,51 - 0,53)
	2018/19	3	5	5 (5,0 - 6,8)	Irrigado	1,73 (3,06 - 0,58)
Santa Maria	2017/18	3	5	5 (4,8 - 7,8)	Não irrigado	3,67 (6,42 - 1,32)
	2018/19	1	3	3 (5,0 - 6,8)	Irrigado	5,80 (6,65 - 4,89)
Santa Vitória do Palmar	2014/15	4	5	5 (4,8 - 8,2)	Irrigado	2,85 (4,48 - 0,92)
	2015/16	3	5	5 (4,8 - 8,2)	Irrigado e Não irrigado	3,52 (4,82 - 1,86)
São Borja	2017/18	3	5	5 (4,8 - 7,8)	Irrigado e Não irrigado	4,09 (5,97 - 1,54)
Uruguaiana	2014/15	3	7	7 (4,8 - 8,2)	Irrigado	3,56 (4,88 - 2,39)
	2018/19	1	18	12 (4,8 - 6,8)	Irrigado e Não irrigado	4,26 (5,69 - 2,35)
	2019/20	1	33	17 (4,8 - 7,8)	Irrigado	4,53 (6,26 - 2,07)

As semeaduras foram realizadas em solo corrigido de acordo com as recomendações técnicas para a cultura da soja e adubação para altas produtividades. As sementes foram inoculadas com estirpes de *Bradyrhizobium japonicum*. O tratamento das sementes foi realizado com fungicida e inseticida, e o controle de plantas daninhas, insetos e doenças realizados de acordo com as recomendações técnicas da cultura (REUNIÃO DE PESQUISA DE SOJA DA REGIÃO SUL, 2018).

O delineamento experimental dos experimentos foi de blocos ao acaso, dispersos em parcelas subdivididas, com três repetições. As épocas de semeadura foram locadas nas parcelas principais e as cultivares nas subparcelas. As parcelas foram compostas por quatro linhas com 5 metros de comprimento e espaçamento de 0,5 m entre fileiras, na densidade de 30 plantas m⁻² e profundidade de semeadura de 0,03 m, com ajustes locais conforme umidade e características do solo. Estes ensaios seguiram os padrões adotados pelo Ministério da Agricultura através do Serviço Nacional de Proteção de Cultivares. Em alguns experimentos de Uruguaiana, Cachoeirinha, São Borja e Santa Vitória do Palmar, ocorreram irrigações ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura quando as plantas apresentaram sinais de déficit hídrico.

As avaliações de produtividade de grãos foram realizadas nas duas linhas centrais, descartadas 0,5 m das extremidades. Após foi determinado a produtividade de soja por hectare a 13% de umidade.

2.2 FUNÇÃO LIMITE PARA DATA DE SEMEADURA E PARA DISPONIBILIDADE DE ÁGUA EM RELAÇÃO AO POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE

O conjunto de dados experimentais foi dividido inicialmente em 3 grupos conforme o GMR das cultivares: grupo I ($GMR < 6.0$); grupo II ($6.0 \leq GMR < 7.0$); grupo III ($GMR \geq 7.0$). Para quantificar a influência da data de semeadura no potencial de produtividade por grupo de GMR foi adotado a metodologia de funções limites (boundary function) proposta por French e Schultz (1984).

Funções limites também foram ajustadas para a relação entre disponibilidade de água (WS) e o potencial de produtividade dos grupos de GMR. A WS foi considerada a soma da precipitação mais irrigação no período da semeadura (SEM) até a maturação fisiológica (R7).

As funções limites foram ajustadas utilizando o software *Microsoft Excel*.

2.3 COMPORTAMENTO DOS GMRs NOS AMBIENTES DE MAIORES E MENORES PRODUTIVIDADES

Considerando cada combinação de local, data de semeadura, e ocorrência ou não de irrigação suplementar, foi determinado um ambiente e sua respectiva média de produtividade, obtendo-se um total de 43 ambientes. Esses ambientes foram ranqueados pela produtividade em dois níveis: Ambientes de maior produtividade e de menor produtividade (Figura 2).

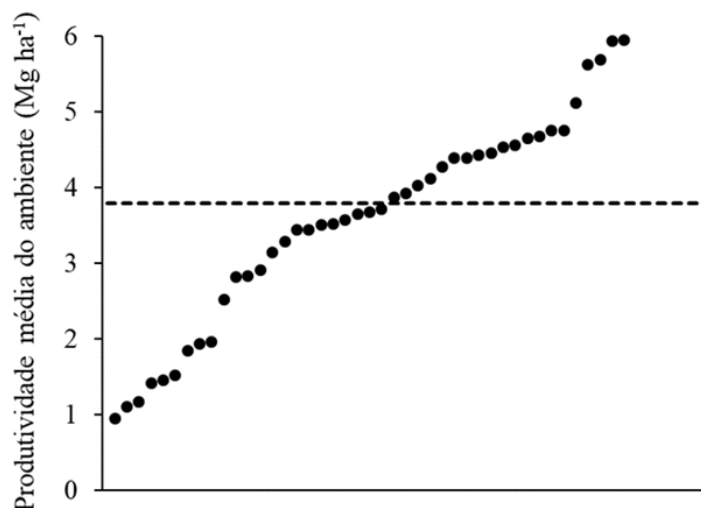


Figura 2 - Média das produtividades de soja em rotação com arroz irrigado em cada ambiente determinado pela combinação: local, data de semeadura e ocorrência ou não de irrigação suplementar. 2014-2020, Rio Grande do Sul, Brasil.

Dentro de cada um desses níveis foi determinada a média das produtividades para os GMRs: ≤ 5.5 , 5.5-6.0, 6.1-6.5, 6.6-7.0 e ≥ 7.1 . As comparações das produtividades permitiram analisar a performance dos grupos nos diferentes ambientes.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 ÉPOCA DE SEMEADURA E GMR

Os 359 resultados de produtividade de soja em rotação com arroz irrigado, obtidos experimentalmente em seis anos agrícolas (2014/2015, 2015/2016, 2016/2017, 2017/2018, 2018/2019 e 2019/2020), com semeaduras que variaram de 30 de setembro até 5 de janeiro e 29 diferentes cultivares em condições com e sem irrigação suplementar, contemplaram todas as épocas de semeadura onde é possível conduzir experimentos em ambiente de rotação com arroz irrigado. As condições ambientais de fotoperíodo, radiação solar, precipitação e temperatura também representam a variabilidade ao qual a região está sujeita. Ao longo dos períodos de condução dos experimentos ocorreram diversos períodos de déficits e excessos hídricos (Anexo 1).

As maiores produtividades experimentais de soja em rotação com arroz irrigado, foram obtidas na segunda quinzena de outubro e primeira quinzena de novembro (Figura 3). Resultados de soja em terras altas para o estado do Rio Grande do Sul mostram que as maiores produtividades são observadas de 20 de setembro até 4 de novembro (ZANON et al., 2016).

Diferentemente dos valores obtidos para terras altas, semeaduras de soja antes de 15 de outubro em áreas de terras baixas, mesmo em condições experimentais, estão sujeitas a períodos de excessos hídricos no início do desenvolvimento, em função da menor demanda evapotranspirativa do período e eventos de precipitação de maior volume.

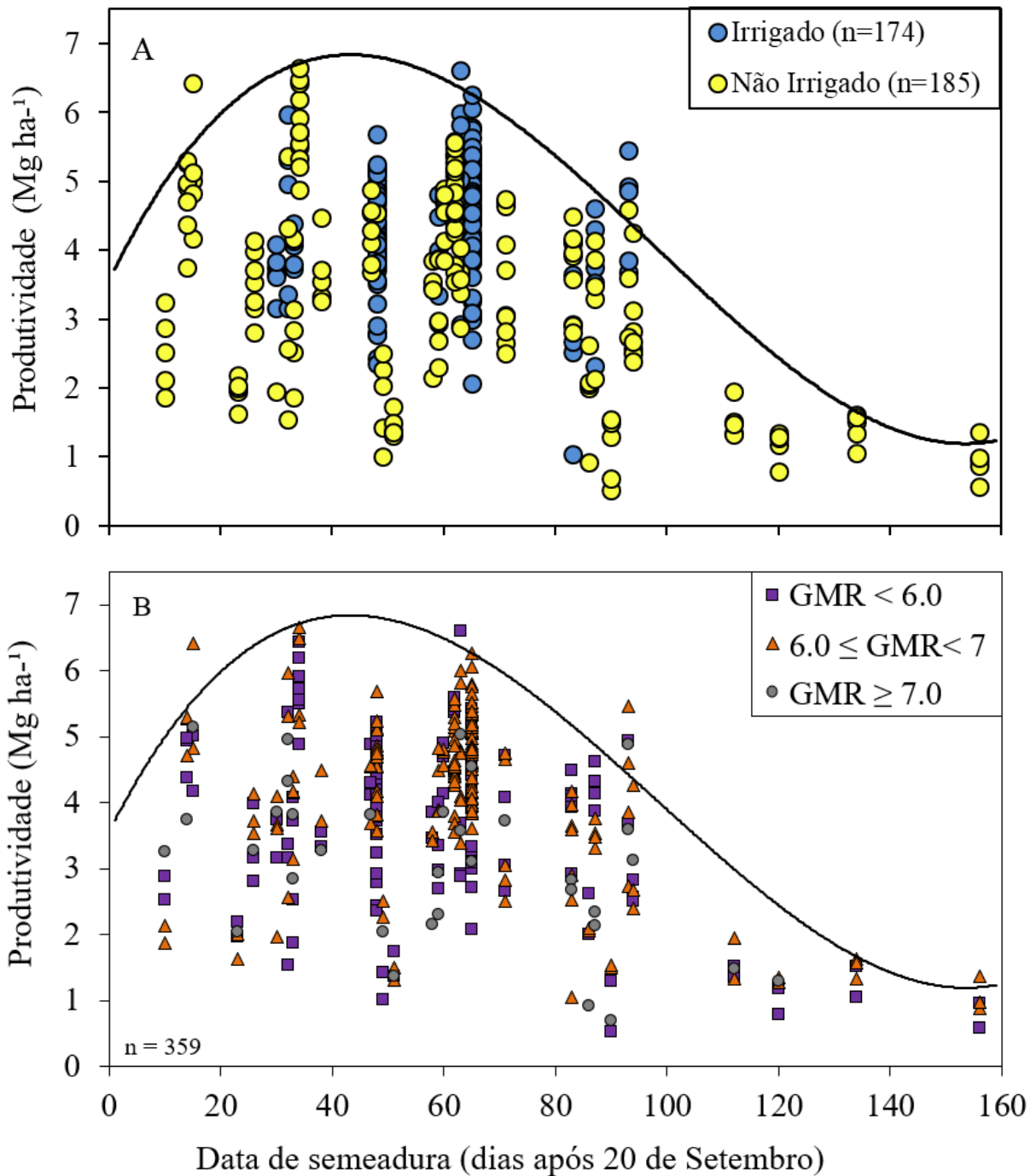


Figura 3 – Relação entre produtividade e data de semeadura (dias após 20 de Setembro) para experimentos de soja cultivada em rotação com arroz irrigado. Caracterizando produtividades com (círculos azuis) e sem irrigação suplementar (círculos amarelos) (A) e diferentes faixas de GMR (B), em três anos agrícolas. A linha sólida mostra a função limite superior (boundary function) para o período. Rio Grande do Sul, Brasil.

$$PP_{DS} = 8E-06 DJ^3 - 0,0025 DJ^2 + 0,1674 DJ + 3,5607 \quad (R^2 = 0.94) \quad (1)$$

Onde, PP_{DS} representa o potencial de produtividade experimental em função da data de semeadura (DS).

As cultivares com grupos de maturidade relativa intermediários ($6.0 < \text{GMR} < 7.0$) apresentam melhor desempenho em relação aos materiais de menor e de maior ciclo (Figura 4). Cultivares de $\text{GMR} < 6.0$ atingiram valores máximos de produtividade semelhantes aos de GMR intermediários, porém com menor participação em produtividades acima de 5 Mg ha^{-1} e um período que permita as maiores produtividades reduzido. As cultivares com pior desempenho foram as de $\text{GMR} > 7.0$.

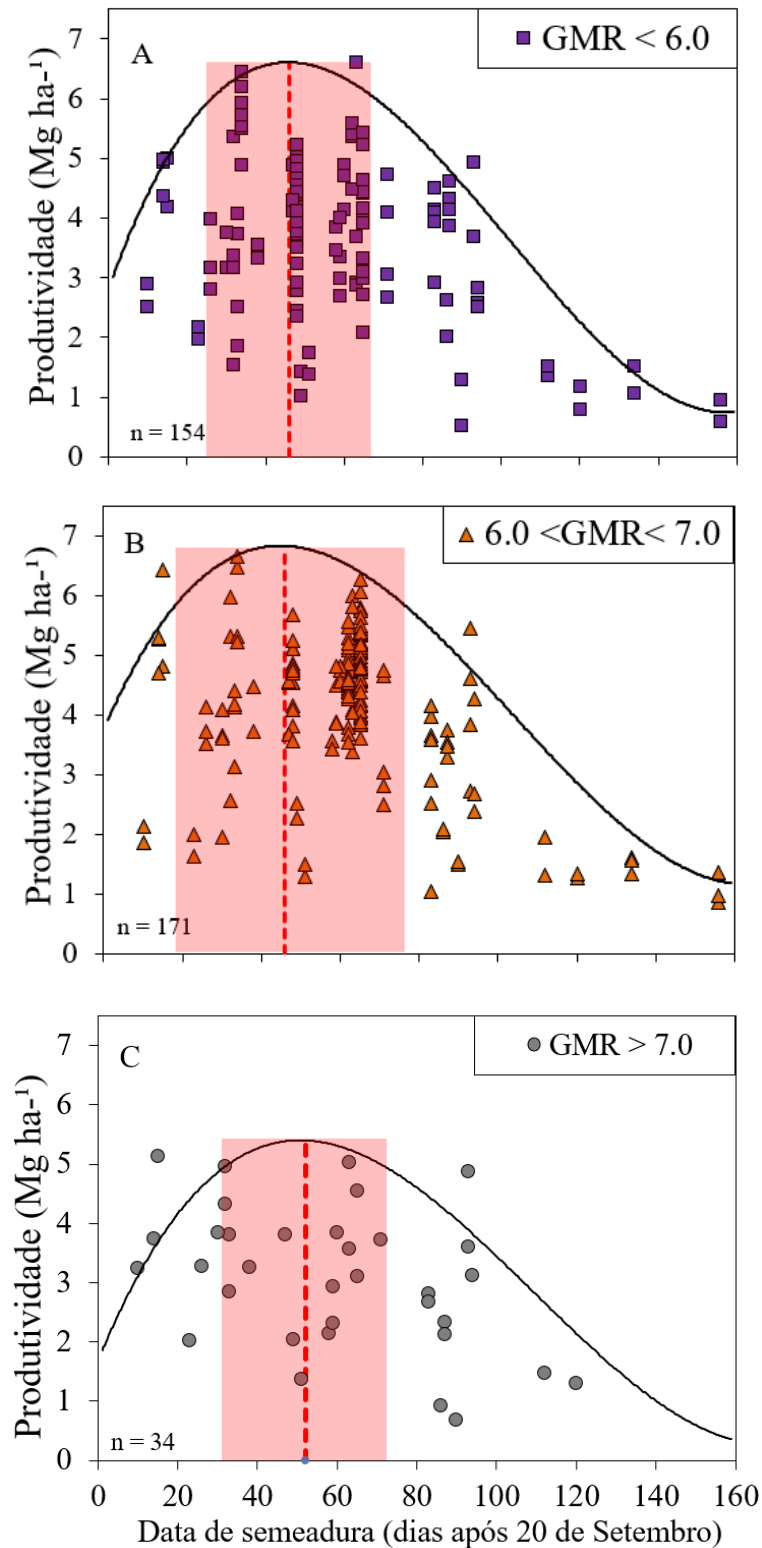


Figura 4 - Relação entre produtividade e data de semeadura (dias após 20 de Setembro) para experimentos de soja cultivada em rotação com arroz irrigado. Em roxo (A) cultivares com Grupo de Maturidade Relativa (GMR) <6.0, em laranja (B) $6.0 < \text{GMR} < 7.0$ e cinza (C) $\text{GMR} > 7.0$. As linhas sólidas mostram as funções limite superior (boundary function) para o período e a área vermelha representa o período onde as maiores produtividades são obtidas dentro de cada faixa de GMR.

$$PP_{GMR < 6.0} = 9E-06 DJ^3 - 0,0026 DJ^2 + 0,1834 DJ + 2,8256 \quad (R^2 = 0.92) \quad (2)$$

$$PP_{GMR 6.0 \leq GMR < 7.0} = 7E-06 DJ^3 - 0,0021 DJ^2 + 0,151 DJ + 3,7653 \quad (R^2 = 0.88) \quad (3)$$

$$PP_{GMR \geq 7.0} = 8E-06 DJ^3 - 0,0025 DJ^2 + 0,1613 DJ + 3,3091 \quad (R^2 = 0.83) \quad (4)$$

Onde, PP_{GMR} representa o potencial de produtividade dos respectivos GMR em função da data de semeadura (DS)

No cultivo de soja é recorrente o posicionamento de cultivares com determinadas características somente em ambientes de alto potencial, onde os riscos são minimizados. Uma dessas características é a utilização de cultivares com menores GMRs em ambientes onde ocorre alto investimento e o perfil de solo não apresenta maiores limitações químicas e físicas. O oposto ocorre com cultivares de maior GMR, que em função dos maiores ciclos, quando são submetidas a períodos de estresse muitas vezes não apresentam perdas tão grandes quanto aquelas de menor ciclo. Essa resposta é muito variável em função do ambiente e dos períodos em que esses estresses ocorrem, além da especificidade de cada cultivar.

A performance produtiva média foi superior em cultivares de GMR 5.6-7.0, tanto para ambientes de maior quanto de menor potencial produtivo (Figura 5). Em ambientes de menor potencial a resposta média se manteve similar para as faixas de GMR 5.6-6, 6.1-6.5 e 6.6-7.0, porém nos ambientes de maior potencial as cultivares de GMR 6.6-7.0 apresentaram cerca de $0,5 \text{ Mg ha}^{-1}$.

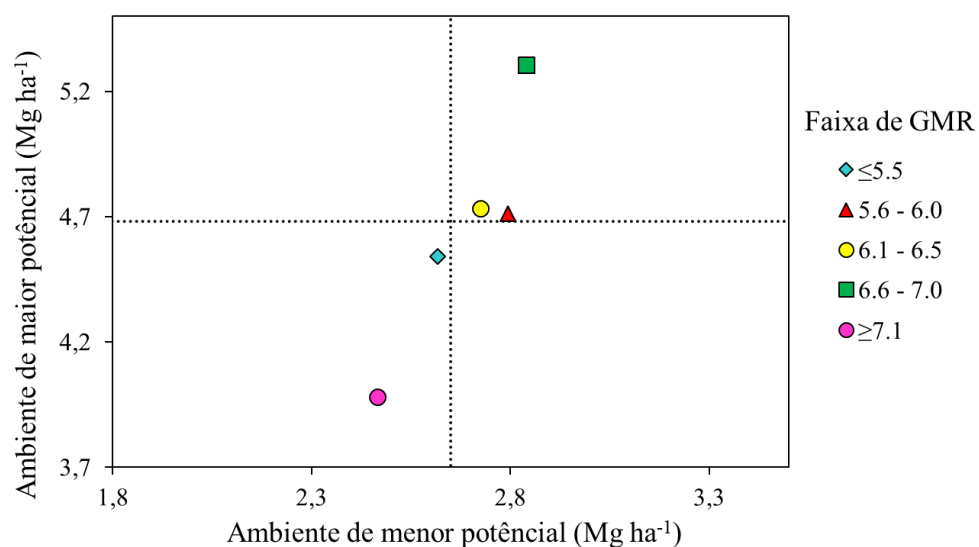


Figura 5 - Produtividade média de soja com diferentes faixas de grupos de maturidade relativa (GMR) cultivada em rotação com arroz irrigado em ambiente de menor potencial de produtividade (eixo X) e ambientes de maior potencial de produtividade (eixo Y). Rio Grande do Sul, Brasil (2014-2020).

A adoção de ciclos maiores é uma alternativa relacionada a estabilidade de produtividade, porém expõe o material a um maior período sujeito a ação de pragas e doenças e maiores custos de manejo fitossanitário. Em ambientes onde o final do ciclo possa coincidir com excessos de chuva e dificuldades na colheita, ciclos maiores podem refletir em perdas em função disso. Essa condição é recorrente nas áreas orizícolas a partir do mês de março.

A recomendação de cultivares com GMRs maiores que 5.5 e menores que 7 representam as melhores alternativas para ambientes de menor e de maior potencial de produtividade, com superioridade das cultivares de GMR entre 6.6-7 nos ambientes de alto potencial.

3.2 PRECIPITAÇÃO E COEFICIENTE FOTOTÉRMICO

Zanon (2016) descreve que o suprimento de água ao longo do ciclo de desenvolvimento da soja no Rio Grande do Sul deve atingir 800mm ou mais para permitir a obtenção de produtividades potenciais. Para a soja em rotação com arroz irrigado, os valores são semelhantes, onde a partir de 650 mm já é possível a obtenção do potencial produtivo, porém a partir de 850mm ocorre um acentuado decréscimo, associado as perdas por excessos hídricos (Figura 6).

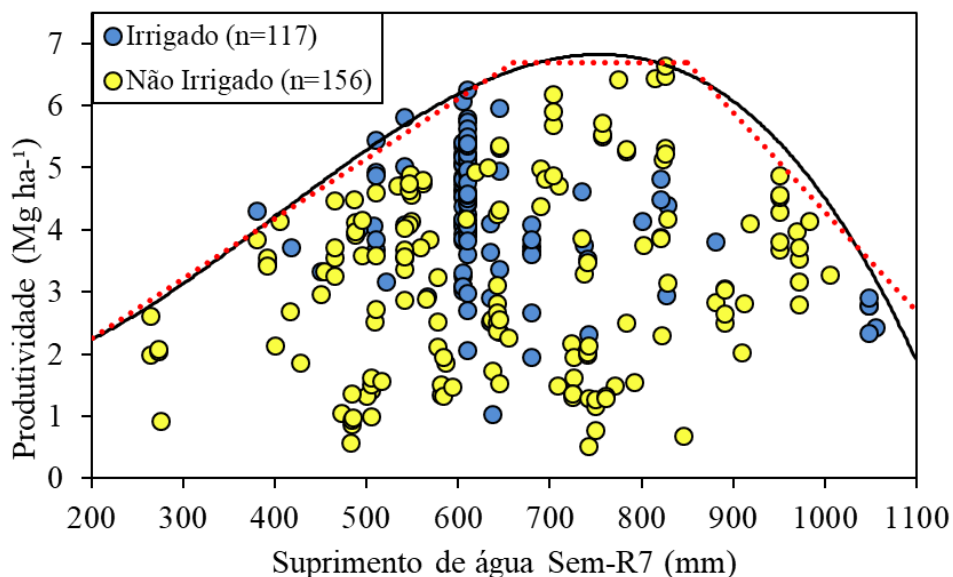


Figura 6 - Relação entre produtividade e suprimento hídrico em mm ao longo do período da semeadura (Sem) até R7 para experimentos de soja cultivada em rotação com arroz irrigado. Caracterizando produtividades com (círculos azuis) e sem irrigação suplementar (círculos amarelos). A linha sólida mostra a função limite superior (*boundary function*) para o período e as linhas vermelhas tracejadas representam as lineares para os momentos de crescimento, platô e queda nas produtividades. Rio Grande do Sul, Brasil (2014-2020).

$$PP_{ws} = -3E-08x^3 + 4E-05x^2 - 0,0029x + 1,6554 \quad (R^2 = 0.91) \quad (5)$$

Onde, e PP_{ws} representa o potencial de produtividade experimental em função da disponibilidade de água (SEM – R7).

A época de semeadura que compreende o período onde as maiores produtividades são obtidas, está relacionada a disponibilidade de radiação solar e temperaturas adequadas ao desenvolvimento da cultura. O coeficiente fototérmico observado entre o período de R3-R7 é o que melhor apresenta correlação com os aumentos de produtividade em condição potencial (ZANON et al., 2016). Para soja cultivada em áreas de rotação com arroz irrigado que atingem elevadas produtividades, o coeficiente fototérmico também é um importante limitante, onde podemos observar que produtividades acima de 5 Mg ha⁻¹ são atingidas somente quando o Q é superior a 0,8 (Figura 7).

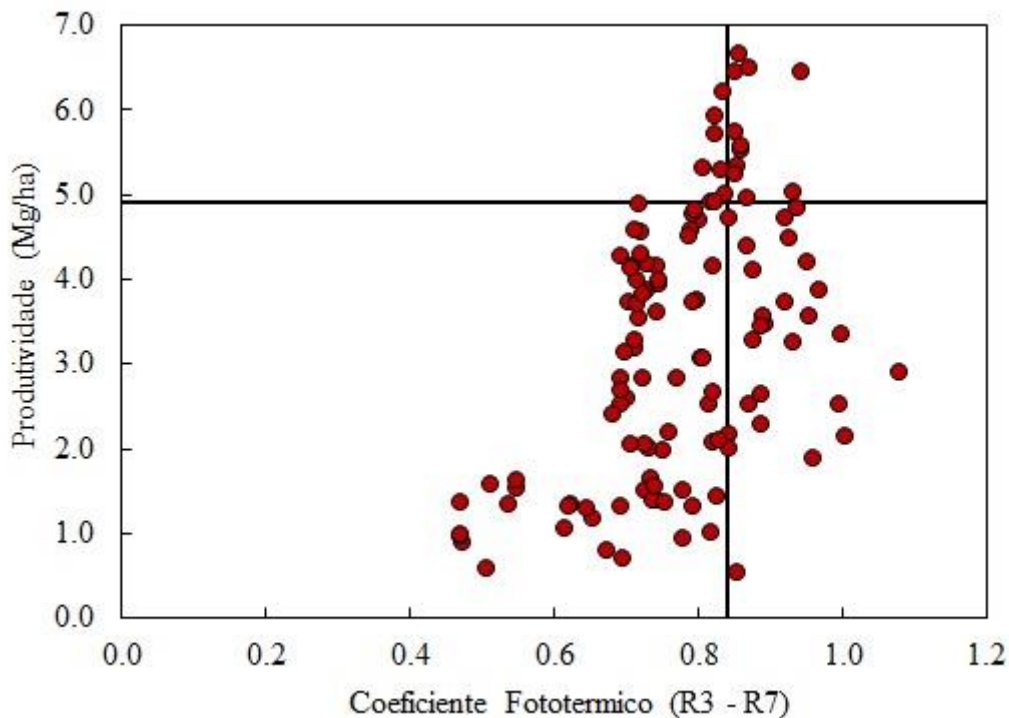


Figura 7 - Relação entre a produtividade e o coeficiente fotérmico (Q) entre R3 e R7 de cultivada em rotação com arroz irrigado. Rio Grande do Sul, Brasil (2014-2020).

Os fatores ambientais que permitem a obtenção de elevadas produtividades de soja em áreas de rotação com arroz irrigado são muito semelhantes aos que ocorrem em áreas de terras altas, porém os períodos em que é possível expressar esses potenciais é mais curto e está diretamente relacionado as condições de hidromorfismo dessas áreas. Neste estudo foram

considerados resultados experimentais, ou seja, áreas onde o controle e manejo é o mais próximo do ideal. Áreas onde o manejo é mais deficiente essas janelas tendem a ser ainda mais escassas e os potenciais raramente atingidos.

4 CONCLUSÕES

As produtividades atingíveis de soja em rotação com arroz irrigado são tão elevadas quanto aquelas atingíveis em áreas de terras altas. O período de semeadura que permite as maiores produtividades é reduzido em relação ao que ocorre em áreas de terras altas para latitudes similares. A antecipação de semeadura permite atingir potenciais mais elevados, porém semeaduras anteriores a 20 de outubro reduzem o potencial e aumentam os riscos.

REFERÊNCIAS

- STRECK, E. V. et al. Solos do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: UFRGS, 2008. 222p.
- ZANON, A. J.; STRECK, N. A.; GRASSINI, P. Climate and management factors influence Soybean yield potential in a subtropical environment. *Agronomy Journal*, [s. l.], v. 108, n. 4, p. 1447–1454, 2016.
- Bortoluzzi, M. P., A. B. Heldwein, R. Trentin, D. D. P. Lucas, E. Z. Righi, and M. Leonardi, 2017: Risk of water surplus in soybean crop on haplic planosol soil in the Central Depression of Rio Grande do Sul State, Brazil. *Cienc. Rural*, 47, 2016.
- Bortoluzzi, M. P., Heldwein, A. B., Trentin, R., Nied, A. H., da Silva, J. R., & da Rocha, L. (2020). ADJUSTMENT OF PROBABILITY FUNCTIONS TO WATER EXCESS AND DEFICIT IN SOYBEANS CULTIVATED IN LOWLAND SOILS. *IRRIGA*, 25(2), 402-419.
- CESB – Comitê estratégico soja brasil. Vencedores de produtividade safra 2019/2020. Acesso em 14/7/20.
- DA ROCHA, T. S. M. et al. Performance of soybean in hydromorphic and nonhydromorphic soil under irrigated or rainfed conditions. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, [s. l.], v. 52, n. 5, p. 293–302, 2017.
- FARIAS, J. R. B.; NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A. L.. Soja. In: MONTEIRO, J. E. B. A. et al. *Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola*. INMET – Instituto Nacional de Meteorologia, 2009. p.109-130. 2009.
- KUINCHTNER, A; BURIOL, G. A. Clima do Estado do Rio Grande do Sul segundo a classificação climática de Köppen e Thornthwaite. *Disciplinarum Scientia*, v.2, p.171-182, 2001.
- PINTO, L.F.S.; LAUS NETO, J.A.; PAULETTO, E.A. Solos de várzea do Sul do Brasil cultivados com arroz irrigado. In: GOMES, A.S.; MAGALHÃES, A.M. *Arroz Irrigado no Sul do Brasil*. Brasília : Embrapa, 2004. cap.3, p.75-96.

3.3 MANUSCRITO 2

POTENCIAL E LACUNAS DE PRODUTIVIDADE DA SOJA CULTIVADA EM ROTAÇÃO COM ARROZ IRRIGADO

RESUMO

A crescente demanda por alimentos no mundo apresenta como principal alternativa a necessidade de aumentar a produtividade das culturas agrícolas, onde a cultura da soja (*Glycine max* (L.) Merrill), surge com papel central. Conhecer as produtividades potenciais, lacunas de produtividade e causas da perda de produtividade permite direcionar ações de agricultores, extensionistas, técnicos e pesquisa. No estado do Rio Grande do Sul, a expansão da cultura vem ocorrendo na metade sul do estado, região tradicionalmente produtora de arroz irrigado apresentando características de solo e de manejo bastante distintas da metade norte do estado. O objetivo deste trabalho foi determinar o potencial e as lacunas de produtividade da cultura da soja cultivada em rotação com o arroz irrigado. Produtividades potenciais foram estimadas por modelo matemático, produtividades atingíveis experimentalmente foram definidas por uma rede de experimentos conduzidas nos últimos anos e um levantamento de dados de lavouras de produtores permitiram definir potenciais, lacunas existentes e possíveis causas de perda de produtividade nesse importante ambiente de produção agrícola do país.

Palavras-chave: Manejo; Modelos agrícolas; Terras baixas.

1 INTRODUÇÃO

O estado do Rio Grande do Sul é um tradicional produtor de grãos e origem de grande parte dos agricultores que desbravaram as demais regiões agrícolas do país. Os primeiros relatos de lavouras comerciais de soja no Brasil ocorreram nesse estado que atualmente produz 1 de cada 30 grãos da leguminosa produzida em todo o mundo. Outro cultivo agrícola de destaque no estado é o arroz irrigado, onde a produção corresponde a 70% da produção nacional. Até a última década, com raras exceções, essas duas culturas agrícolas coexistiam em ambientes distintos, porém o cultivo de arroz irrigado estava sendo inviabilizado em muitas áreas, principalmente em função da elevada infestação de plantas daninhas de difícil controle.

Uma alternativa de produção para essas áreas foi a introdução da rotação com soja, apresentando-se como uma alternativa economicamente viável e que permite o controle de

gramíneas que eram praticamente impossíveis de manejar em meio ao arroz. Além disso, o sistema começou a contar com demais benefícios que a rotação de gramíneas com leguminosas apresenta, como aporte de nitrogênio, melhorias em características físicas, melhorias no manejo integrado de pragas e doenças, ciclagem de nutrientes etc.

O cultivo de arroz irrigado no Rio Grande do Sul, ocorre tipicamente em áreas de terras baixas, com predomínio das classes planossolos (56%) e chernossolos (16%), além de áreas com gleissolos, plintossolos, neossolos, vertissolos e associação entre esses. Características naturais e dos manejos de solo realizados ao longo dos anos na lavoura orizícola trazem limitações físicas para o cultivo de soja em função, principalmente da alta densidade, baixa porosidade, baixa condutividade hídrica, presença de uma camada compactada próxima a superfície etc. Para minimizar as perdas por déficit e excesso hídrico que essas características físicas trazem a essas áreas, uma série de práticas de manejo vem sendo estudada, difundidas e adotadas.

Apesar dos desafios impostos pelas características dessas áreas, produtividades elevadas estão sendo obtidas em nível experimental e de lavouras comerciais (CESB 2020), porém a média de produtividade de soja em rotação com arroz irrigado ($2,1 \text{ Mg ha}^{-1}$) é inferior a média geral do estado e do país, indicando que ainda há muito a ser feito para elevar essas produtividades e aumentar a rentabilidade desse importante sistema de produção.

A definição de potenciais de produtividade e das lacunas existentes entre os potenciais e os diferentes níveis de produtividade (experimental, melhores produtores e média de determinada região) permite conhecer a capacidade produtiva de um sistema e auxiliar na identificação dos fatores que causam as lacunas existentes (LOBELL et al., 2009).

A produtividade potencial é a produtividade de uma cultura quando esta não sofre limitações de água, nutrientes e estresses abióticos (VAN ITTERSUM; RABBINGE, 1997). Quando a produtividade potencial é expressada, os fatores que determinam o desenvolvimento são apenas a radiação solar, temperatura, CO_2 atmosférico e as características genéticas da cultivar. A definição da produtividade potencial limitada por água é semelhante a produtividade potencial, mas o crescimento da cultura é limitado pelo fornecimento de água, e, conseqüentemente, influenciado pelo tipo de solo (capacidade de retenção de água e profundidade de enraizamento), o que na prática acontece no Estado do Rio Grande do Sul, principalmente na metade Sul. A produtividade potencial limitada por água representa a condição mais expressiva para a caracterização no Estado do Rio Grande do Sul. Para as culturas irrigadas, tanto o potencial de produtividade como o potencial de produtividade

limitada por água podem servir de referência para determinar o potencial da cultura em determinada região (VAN ITTERSUM et al., 2013).

O objetivo deste trabalho foi estimar o potencial e as lacunas de produtividade da cultura da soja cultivada em rotação com o arroz irrigado.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 CARACTERIZAÇÃO E DIVISÃO ZONAS CLIMÁTICAS

A região estudada compreende as áreas de produção de soja em rotação com arroz irrigado na metade sul do estado do Rio Grande do Sul correspondendo a 36% da área cultivada com arroz no estado (CONAB, 2020).

As regiões foram agrupadas com base no clima, para melhor representar a variabilidade existente, seguindo a metodologia proposta por Van Wart et al. (2013) e utilizada pelo Global Yield Gap Atlas (<http://www.yieldgap.org>). Essa classificação leva em consideração três variáveis agroclimáticas que governam a produção da cultura da soja, sendo elas: (i) total anual de acúmulo de graus dias (Figura 1A), (ii) índice de aridez anual (Figura 1B) e (iii) sazonalidade de temperatura (Figura 1C). De acordo com essa classificação, a região de estudo foi dividida em 11 zonas climáticas (ZC) homogêneas (Figura 1D).

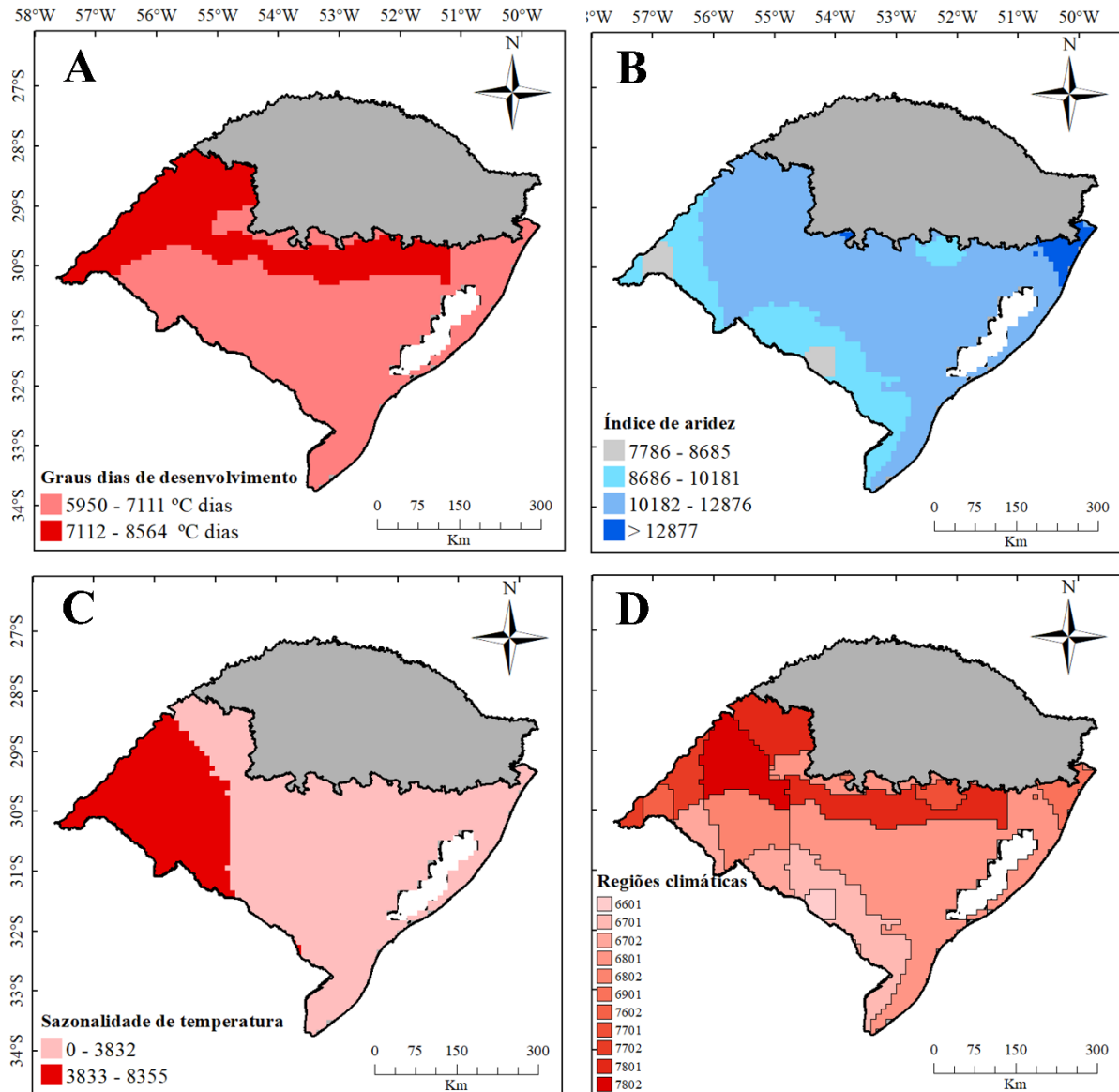


Figura 18 - Divisão da metade sul do Rio Grande do Sul em regiões climáticas, seguindo os critérios: (A) acúmulo de graus dias anual, (B) índice de aridez (precipitação/evapotranspiração), (C) sazonalidade de temperatura e (D) representa as 11 regiões climáticas presentes na metade sul do Rio Grande do Sul – Brasil.

Um mapa de colheita foi elaborado com base nos registros disponíveis de área colhida do IRGA nos últimos 5 anos (2015-2020) e sobreposto as zonas climáticas, para a identificação das ZC que apresentam participação na produção de soja do estado (Figura 2). Selecionou-se todas ZC que apresentaram mais de 5% de abrangência da área de colheita de soja, assim totalizando 5 ZC selecionadas, representando 84,7% da área produtiva de soja em rotação com arroz irrigado (Figura 3).

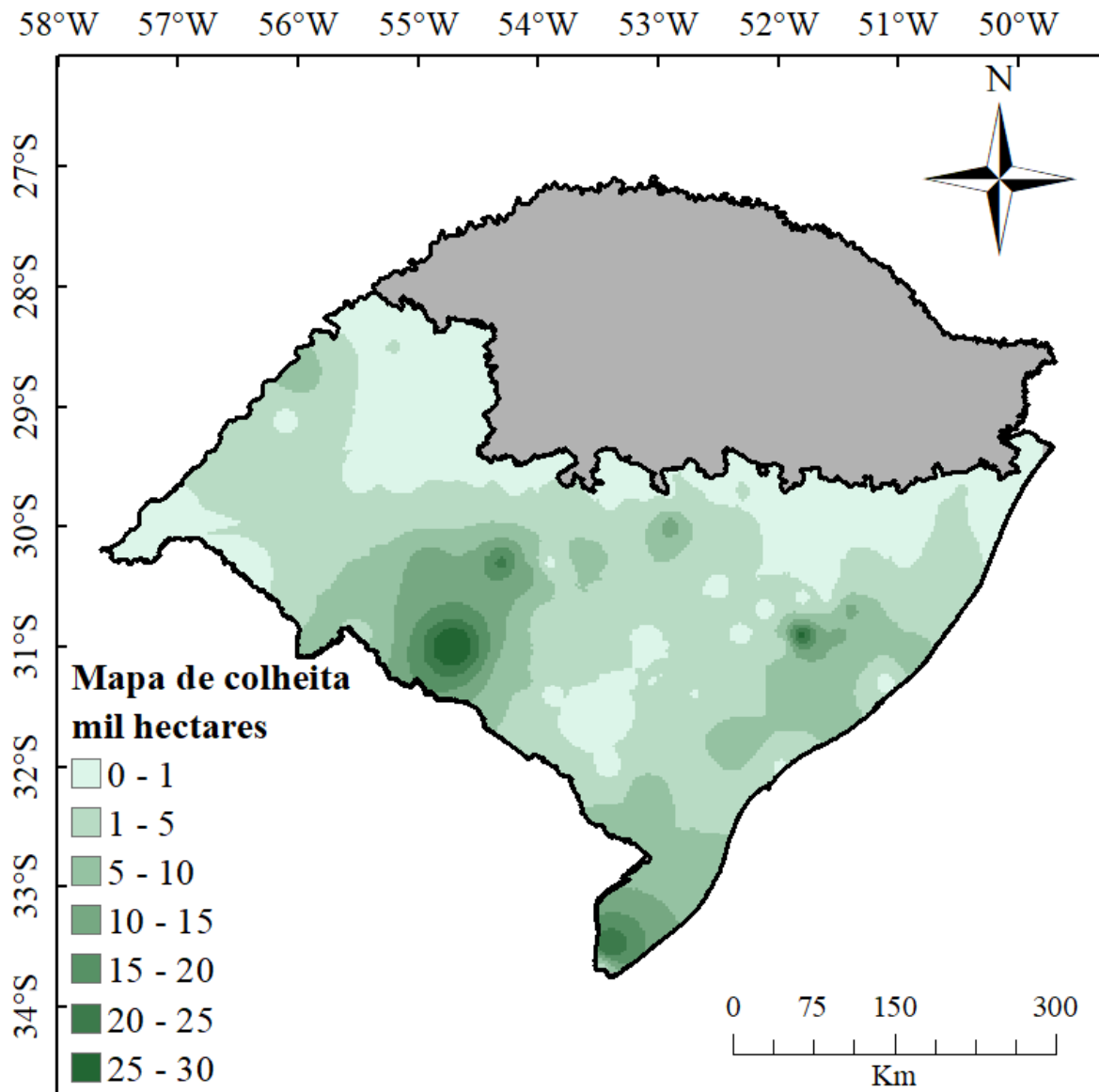


Figura 2 - Mapa de colheita de soja em rotação com arroz irrigado na metade sul do Rio Grande do Sul, com base nos dados municipais disponíveis do IRGA para o período (2015-2020).

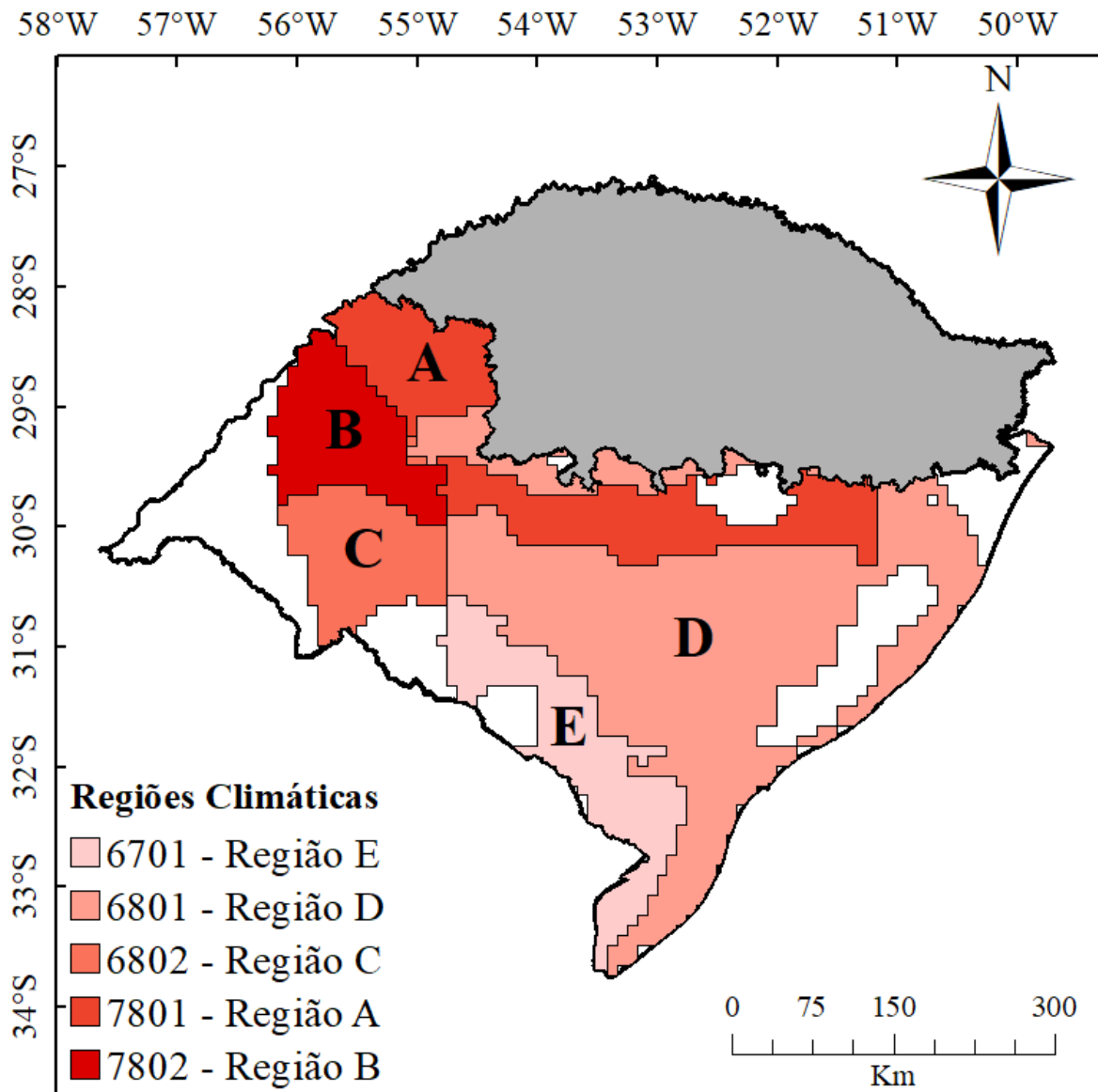


Figura 3 - Regiões climáticas representativas das áreas cultivadas com soja em rotação com arroz irrigado na metade sul do Rio Grande do Sul – Brasil.

Segundo Grassini et al. (2015a), para uma estimativa robusta e confiável é necessário estimar o PPA para no mínimo 15 anos, para atender esse critério foi utilizado estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) com dados disponíveis para esse período e utilizadas para criar as *buffers zones* (Regiões de abrangência da estação - BZs) numa área de 100 km de diâmetro, sendo elas delimitadas pelos limites das ZC (Figura 4). Foram selecionadas as *buffers zones* (BZs) com mais de 5% da área de colheita, evitando mais de 20% de sobreposição entre elas. Dessa forma, 8 BZs (I a XII) foram selecionadas, totalizando 59% da área produtora de soja em rotação com arroz irrigado.

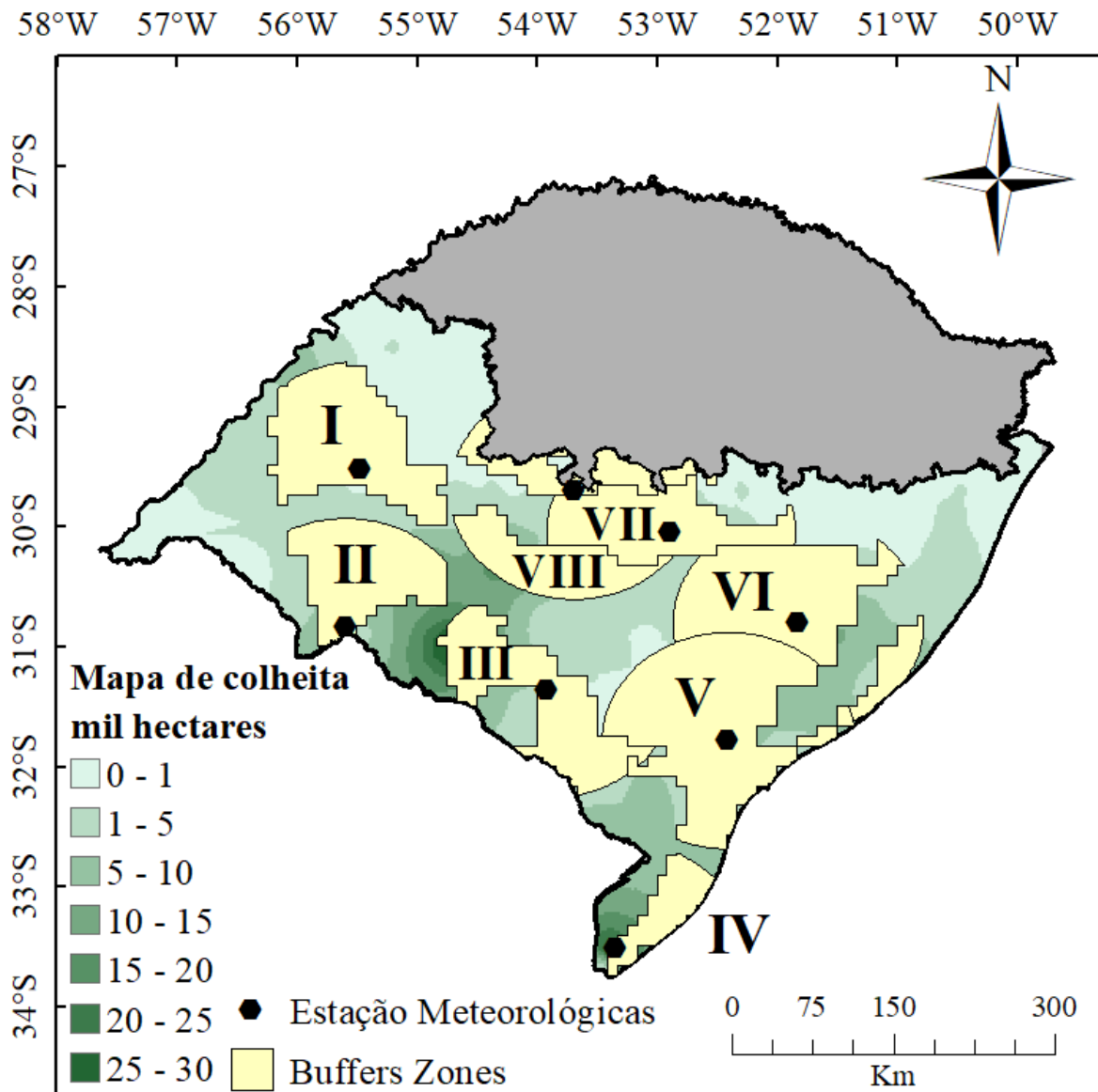


Figura 4 - Buffer zones representativas da área produtiva de soja em rotação com arroz irrigado na metade sul do Rio Grande do Sul.

Os solos foram selecionados de acordo com a proporção em cada *buffer zone*, com os seguintes critérios: (i) solos que ocupam com mais 20% da área da *BZ*; (ii) selecionar solos até atingir uma representatividade mínima de 50% das *BZs* (EDREIRA et al., 2017). Para cada solo selecionado foi recuperado dados das propriedades dos solos necessárias para a simulação de PPA, utilizando o site ISRIC world soil information (<https://www.isric.org/explore/soilgrids>).

2.2 SIMULAÇÃO DO POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE E POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE LIMITADO POR ÁGUA E ESTIMATIVA DAS LACUNAS DE PRODUTIVIDADE

O potencial de produtividade (PP) de soja foi estimado por três métodos, conforme descrito por Lobell et al. (2009): (a) por modelos agrícolas, (b) por experimentos conduzidos em nível potencial e (b) por máximo produtividades de produtores. As datas de semeadura definidas para determinar os potenciais pelos três métodos compreendem o período de 20 de outubro a 15 de novembro, onde as condições ambientais permitem elevadas produtividades e são viáveis dentro do sistema de produção, além de minimizar riscos por estresse hídrico.

Para a estimativa do PP e o PPA por modelos, foi utilizado o CSM-CROPGRO-Soybean e realizado simulações utilizando os grupos de maturidade relativa (GMR) mais utilizados pelos produtores para cada BZs (Tabela 1). As simulações foram realizadas para 15 anos agrícolas (2004/2005 – 2018/2019), segundo Grassini et al. (2015a) valores necessários para uma estimativa precisa e segura. O banco de dados meteorológicos compreende a ampla variabilidade climática anual existente na região (Figura 5).

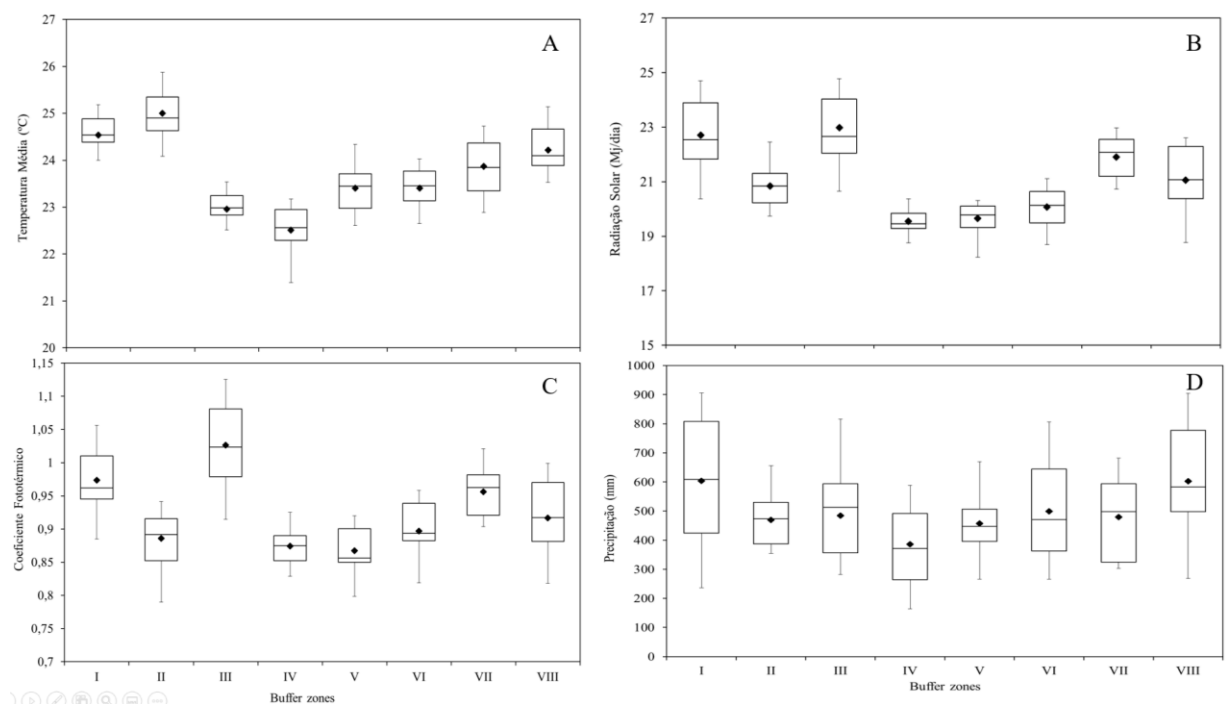


Figura 5 - Dados meteorológicos médios (2004 – 2019), (A) Temperatura média (°C), (B) radiação solar (MJ dia⁻¹), (C) coeficiente fototérmico (MJ dia⁻¹ °C⁻¹), (D) precipitação (mm)

para o período de dezembro – março, com exceção do coeficiente fototérmico (R1 até R7), nas diferentes buffers zones do Rio Grande do Sul.

As simulações ocorreram em intervalos de 5 em dias, iniciando dia 20 de outubro e finalizando 15 de novembro, período onde é possível atingir elevadas produtividades e minimizar riscos por excesso e déficit hídrico. Demais características e variáveis utilizadas para simulação dos potenciais de produtividade e potenciais limitado por água nas diferentes BZs estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1 - Caracterização das variáveis utilizadas para simulação do potencial de produtividade e potencial de produtividade limitado por água de soja em rotação com arroz irrigado nas buffers zones da metade sul do Rio Grande do Sul – Brasil.

Buffers Zones	Local	Região Climática (ZC)	Data de Semeadura	GMR	Tipo de Solo
I	Alegrete	ZC 7802 - Região B	20 de Out. – 15 de Nov.	6.0 e 6.5	Planossolo
II	Santana do Livramento	ZC 6802 - Região C	20 de Out. – 15 de Nov.	6.0 e 6.5	Planossolo Chernossolo
III	Bagé	ZC 6701 - Região E	20 de Out. – 15 de Nov.	6.0 e 6.5	Planossolo Chernossolo
IV	Santa Vitória do Palmar	ZC 6801 - Região D	20 de Out. – 15 de Nov.	6.0 e 6.5	Planossolo
V	Pelotas	ZC 6801 - Região D	20 de Out. – 15 de Nov.	6.0 e 6.5	Planossolo
VI	Camaquã	ZC 6801 - Região D	20 de Out. – 15 de Nov.	6.0 e 6.5	Planossolo
VII	Cachoeira do Sul	ZC 7801 - Região A	20 de Out. – 15 de Nov.	6.0 e 6.5	Planossolo
VIII	Santa Maria	ZC 6801 - Região D	20 de Out. – 15 de Nov.	6.0 e 6.5	Planossolo

O potencial de produtividade por experimentos (PPE) foi estimado a partir da condução de experimentos em nível tecnológico potencial em 10 locais do Rio Grande do Sul durante 6 anos agrícola. Mais informações sobre os experimentos podem ser encontrados no Manuscrito 1, sendo o PPE definido como a média dos 5% do percentil superior, conforme utilizado por Lobell et al. (2009); Edreira et al. (2017).

Para estimativa do PP pelas máximas produtividades dos produtores (PP_P) foram utilizados dados obtidos em quatro anos agrícolas (2015/2016, 2016/2017, 2017/2018 e 2018/2019) através da aplicação de questionários junto aos produtores agrícolas (Figura 6). O PP_P definido como a média dos 5% do percentil superior dentro do período considerado ideal

de semeadura. A estimativa das lacunas de produtividade foi determinada pela diferença entre os potenciais de produtividade (PP, PPA, PP_E e PP_P) e a produtividade média (PM).

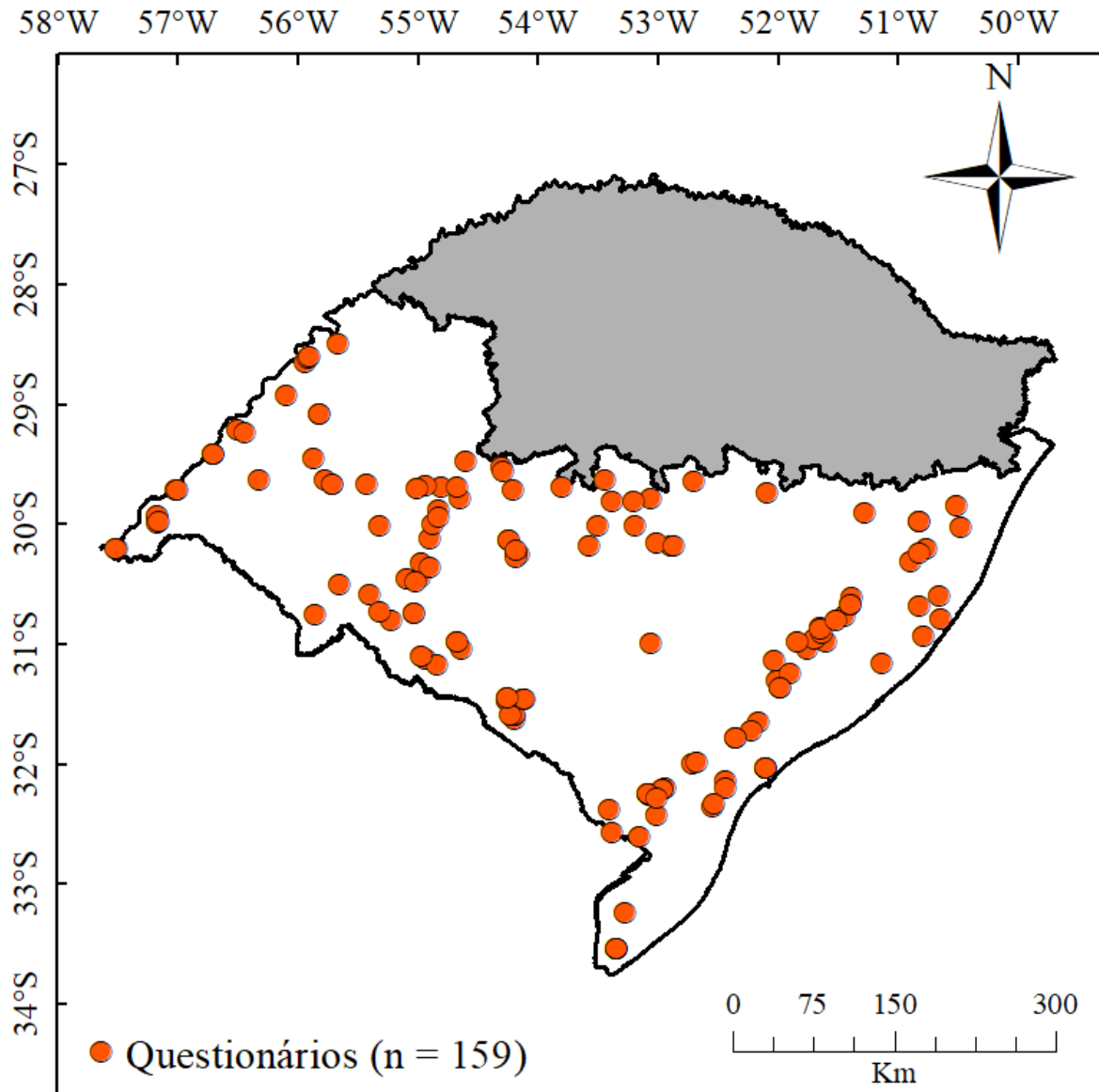


Figura 6 - Mapa do Rio Grande do Sul com a localização dos questionários aplicados em lavouras comerciais de produtores em quatro anos agrícolas (2015-2019)

2.3 IDENTIFICAÇÃO DE FATORES QUE CAUSAM AS LACUNAS DE PRODUTIVIDADE

Durante 4 anos agrícolas (2015/2016, 2016/2017, 2017/2018 e 2018/2019), extensionistas do IRGA e integrantes da equipe Field Crops acompanharam 159 lavouras comerciais de soja em rotação com arroz irrigado. Essas lavouras englobam as distintas características edafoclimáticas e de sistemas produtivos existentes nas regiões orízicolas do Rio

Grande do Sul. Foram coletados dados de produtividade e de manejo da soja, como data de semeadura, grupo de maturidade relativa, irrigação, fertilização, sistema de preparo da área, manejo fitossanitário, rotação e sucessão de cultura, entre outras práticas realizadas nas lavouras comerciais (Tabela 2).

Tabela 2 - Dados coletados em lavouras de produtores de soja em rotação com arroz irrigado no Rio Grande do Sul durante quatro anos agrícolas (2015 – 2019).

Parâmetros	Variáveis solicitadas	Informações fornecidas
Informações da cultura e da lavoura	Coordenadas da lavoura	Latitude, longitude
	Regime de água	Irrigado / sequeiro
	Cultivar	Nome da cultivar
	Grupo de Maturação	GMR
	Data de semeadura	Dia do ano
	Data do florescimento	Dia do ano
	Método de plantio	Plantio direto / Convencional
	Safra anterior	Nome da cultura da safra
	Produtividade	Mg por ha (13% de umidade)
	Fertilizante	
Insumos aplicados	Nitrogênio	Kg N por ha
	Fósforo	Kg P por ha
	Potássio	Kg K por ha
	Calcário	Sim / não
	Inoculação	Sim / não
	Tratamento de sementes	Sim / não
	Aplicação foliar de pesticidas durante a temporada	
Outros fatores redutores de produtividade	Herbicida	Sim / não (quantas aplicação)
	Fungicida	Sim / não (quantas aplicação)
	Inseticida	Sim / não (quantas aplicação)
	Características do solo	Análise do solo
	Utilização de Gado	Sim / não
	Presença de camada compactada	Sim / não
	Utilização de sementes certificada	Sim / não

Para avaliar a qualidade, os dados de produtividade relatados pelos produtores foram comparados com os dados de produtividade do IRGA (<https://irga.rs.gov.br/safras-2>).

A análise desse banco de dados demonstrou que, quando calculada a média da produtividade informada pelos produtores (2,7 Mg ha⁻¹) foi 22 % mais alta que a produtividade média da série histórica do IRGA (2,2 Mg ha⁻¹). Esses resultados indicam que o banco de dados

apresenta uma maior participação de lavouras de altas produtividades em relação a distribuição real do sistema, porém todos os níveis de produtividades existentes estão presentes no banco de dados com grande amplitude (0,9 a 6,7 Mg ha⁻¹), representando a realidade das lavouras nesse sistema de produção (Figura 7).

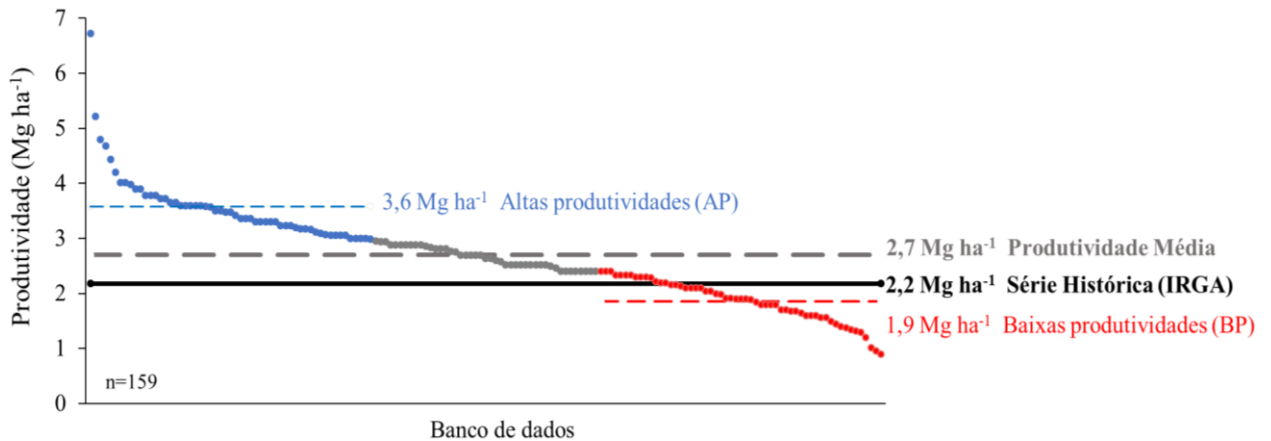


Figura 7 - Produtividades das lavouras de soja em rotação com arroz irrigado que compõem o banco de dados divididas e média da série histórica do IRGA (2009-2020).

O conjunto de dados foi separado em tercil superior (altas produtividade - AP) e tercil inferior (baixas produtividades -BP) de acordo com a distribuição de produtividades das lavouras em cada combinação região e ano agrícola (GRASSINI et al., 2015b). A diferença entre as médias de AP – BP computadas para cada variável foram avaliadas utilizando o teste t ou Wilcoxon (quando não apresentava normalidade dos dados). A associação entre as classes de AP e BP com outras práticas de manejo como método de semeadura, cultura antecessora e aplicação de herbicidas foi avaliada usando o teste qui-quadrado.

Análise de árvore de regressão foi realizada para determinar as práticas de manejo que estão causando as lacunas de produtividade para os diferentes níveis de produtividade na cultura da soja usando o pacote “rpart” em R. A análise de árvore de regressão é um método não paramétrico que particiona recursivamente os dados em grupos sucessivamente menores com divisões binárias baseadas em uma única variável preditora contínua (BREIMAN et al., 1984).

A análise em árvore de regressão produz uma saída do diagrama em árvore, com ramificações determinadas pelas regras de divisão e uma série de nós terminais que contêm a resposta média (isto é, produtividade) e o número de observações que caem dentro de cada nó terminal.

O procedimento ocorre inicialmente criando árvores máximas e, em seguida, usou a técnica de validação cruzada para “podar” a árvore para um tamanho ideal (THERNEAU;

ATKINSON, 1997). Um pacote de "acento circunflexo" em R foi usado para dividir o conjunto de dados em conjuntos de dados de calibração (70 %) e validação (30 %). O conjunto de dados de calibração foi usado para executar a análise da árvore de regressão, enquanto o conjunto de dados de validação foi utilizado para estimar o erro quadrático médio da raiz (RMSE) entre a produtividade observada e a prevista. A análise em árvore de regressão tratou os valores ausentes nos fatores explicativos (função `na.rpart`), excluindo os casos apenas se a variável de resposta (isto é, produtividade) ou todos os fatores explicativos estavam ausentes. Quando foram encontrados valores perdidos ao considerar uma divisão, eles foram ignorados e as previsões são calculadas a partir dos valores não ausentes desse fator (VENABLES; RIPLEY, 2002).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE, POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE LIMITADO POR ÁGUA E LACUNAS DE PRODUTIVIDADES NAS *BUFFERS ZONES*

O Potencial de produtividade (PP) da metade sul do Rio Grande do Sul variou de 6,3 a 6,8 Mg ha⁻¹ nas diferentes *BZs* (Figura 7A), as quais representam 67% da área onde a soja é cultivada em rotação com arroz irrigado no estado. O maior PP foi encontrado na *BZ I* (6,8 Mg ha⁻¹), localizada na região oeste do estado. Os menores PP foram observados nas *BZs II, IV e V* (6,3 Mg ha⁻¹) que representam 28,4% da área cultivada com soja no estado. Estes locais com menores PP estão relacionados com menor radiação solar e menor coeficiente fototérmico o que é confirmado por Edreira et al. (2017); Grassini et al. (2015b); Zanon et al. (2016).

Produtividades potenciais maiores foram observadas nas simulações de datas de semeaduras anteriores ao período considerado para definir o potencial (20 de outubro – 15 de novembro). Esses resultados para semeaduras ocorridas de forma mais antecipada também foram encontrados em campo no Rio Grande do Sul, porém em estudos que consideravam toda a região produtora do estado (ZANON et al., 2016). Semeaduras anteriores a 20 de outubro não permitem atingir as maiores produtividades de soja nos sistemas de produção onde ocorre o cultivo de arroz irrigado. As características físicas do solo associadas, muitas vezes as cotas mais baixas dessas áreas, tornam recorrentes os excessos hídricos (BORTOLUZZI et al., 2017) e nem mesmo em áreas experimentais onde a drenagem é o mais próximo do ideal é possível atingir produtividades próximas ao potencial simulado pelo CSM Cropgro-soybean para essas condições, já que em condição potencial o modelo considera o solo e a disponibilidade hídrica

como ideias.

O Potencial de produtividade limitado por água (PPA) variou de 2,5 (*BZ* III) até 3,4 Mg ha⁻¹ (*BZ* VIII) entre as *BZs* (Figura 7B), sendo a região central do estado a que apresentou os maiores PPA (à IV). A região central do RS apresentou maior quantidade e melhor distribuição de precipitação, (Figura 8F) durante as estações de cultivo. O potencial de produtividade limitado por água sofre grande alteração pelo perfil de enraizamento do solo Battisti et al. (2017).

A produtividade média (PM) do estado ao longo da série histórica de dados de soja em terras baixas (2009 – 2019) variou entre as *BZs* de 1,7 à 2,3 Mg ha⁻¹ (Figura 8C). Este comportamento foi muito semelhante ao encontrado para a PPA, sendo as *BZs* IV, V e VI as que apresentaram os maiores PMs (2,2, 2,2 e 2,3 Mg ha⁻¹ respectivamente).

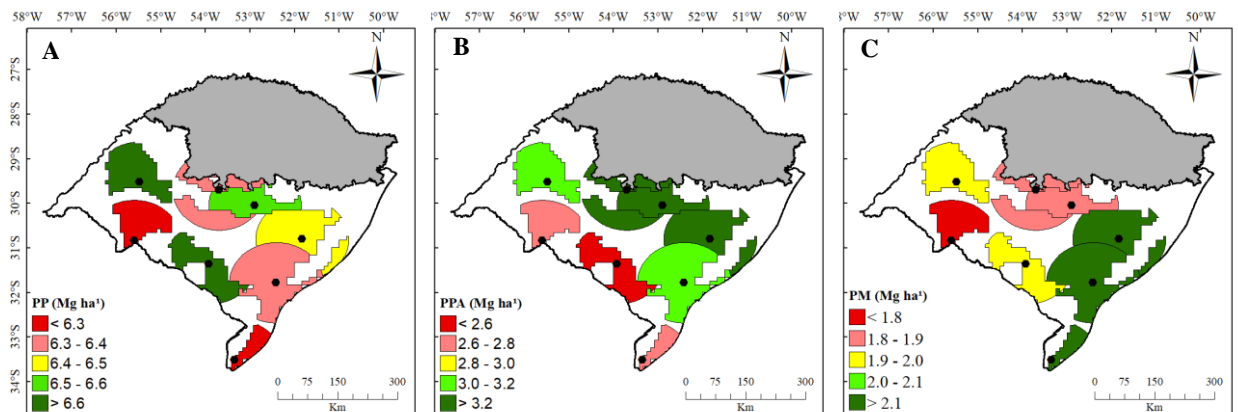


Figura 8 - (A) Potencial de produtividade (PP) (2004-2019), (B) Produtividade potencial limitada por água (PPA) (2004-2019) e (C) Produtividade média (2009-2020) nas diferentes buffers zones da região produtora de soja em rotação com arroz irrigado na metade sul do Rio Grande do Sul.

Conhecendo os PP, PPA e as PM das *BZs*, diversas lacunas de produtividades foram criadas no estado, possibilitando entender nas diferentes regiões quais são os fatores causadores dessas lacunas. Quando usamos o PP como referência, observou-se uma grande lacuna existente, variando de 65% (*BZ* VI) à 72% (*BZ* II) (Figura 9A). Dividimos essa lacuna considerando as perdas de produtividade causadas pelo déficit hídrico e por práticas de manejo, e foi observado que a falta de água durante o ciclo da cultura causou uma lacuna que variou de 47 à 62% (3,0 a 4,1 Mg ha⁻¹).

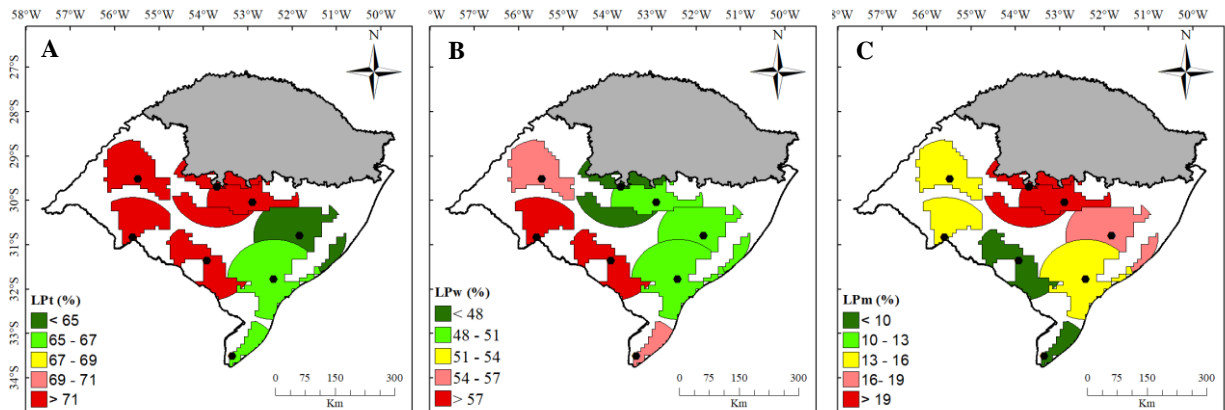


Figura 99 - (A) Lacuna de produtividade total (%LPT), (B) Lacuna de produtividade causada pelo déficit hídrico (%LPw) e (C) lacuna de produtividade manejo (LPM) nas diferentes buffers zones na metade sul do Rio Grande do Sul.

A perda de PP pelas práticas de manejo apresentou uma menor variação, sendo de 9 a 24% da PP, ou seja, 0,6 a 1,6 Mg ha⁻¹. No Brasil, Sentelhas et al. (2015) encontraram uma lacuna de produtividade de 1.6 Mg ha⁻¹ resultante da deficiência hídrica e outra de 0.5 Mg ha⁻¹ resultante do manejo. Assim, nossos resultados ressaltaram que as lacunas de produtividade são dependentes do potencial de produtividade da cultura na região e da produtividade média dos produtores, e que este tema deve ser estudado de forma regionalizada, para que se identifique regiões ou sistemas de produção onde os fatores limitantes da produtividade se assemelham, possibilitando a realização de uma extrapolação tecnológica confiável e rentável para os produtores (VAN OORT et al., 2017).

3.2 POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE E LACUNAS DE PRODUTIVIDADE NA SOJA CULTIVADA EM ROTAÇÃO COM ARROZ IRRIGADO

A Figura 10 mostra o potencial de produtividade médio (PP_{médio}) do RS que foi estimado pelo modelo CSM-CROPGRO-Soybean, resultante da média ponderada da área de colheita das BZs, atingindo o valor de 6,4 Mg ha⁻¹, experimentos conduzidos em condição potencial atingiram 6,5 Mg ha⁻¹ e as máximas produtividades das lavouras atingiram 4,8 Mg ha⁻¹. A variação entre os métodos utilizados para estimar os potenciais produtivos, segundo Lobell et al. (2009) é esperada, sendo normalmente PP > PP_E > PP_P. A estimativa do PP por modelos é a mais precisa, pois simula sem nenhum tipo de limitação biótica, somente com as condições climáticas, desde que o modelo esteja bem calibrado para a região e possua os dados meteorológicos necessários para rodar o modelo (LOBELL et al., 2009).

O PP_E é uma medida direta do potencial de produtividade, porém, experimentos devem

ser conduzidos a nível potencial, ou seja, sem limitações de nutriente, água, pragas, doença ou qualquer fator adverso que possa causar alguma limitação para a cultura, além de difícil condução é necessário a repetição em diversos anos, para garantir que a estimativa do PP_E represente a variabilidade climática do local (GRASSINI et al., 2015a; LOBELL et al., 2009).

O valor de PP_E $0,1 \text{ Mg ha}^{-1}$ superior ao PP pode ser explicado pela definição a partir da Boundary Function das maiores das produtividades no período preferencial de semeadura, que traz dados de diversos anos e seleciona 5% dos melhores valores para o período, enquanto a PP é definida pela média de 15 anos para o período. Esse valor indica que o banco de dados experimentais foi capaz de atingir valores de PP , ou seja em condições em que não ocorreram estresse biótico e abióticos proporcionando a expressão máxima da produtividade nesse ambiente.

A estimativa do PP_P é menos comum, pois normalmente se baseia em relatos dos produtores, e dificilmente produtores realizam manejos para atingir o potencial de produtividade, uma vez que seu principal objetivo é o retorno econômico, no entanto, quando identificados produtores com registros confiáveis e manejo que possibilita a abordagem de potencial de produtividade, torna-se uma alternativa realística e confiável (LOBELL et al., 2009) e vem sendo utilizado em diversos estudos, com nos Estados Unidos por Edreira et al. (2017), o qual utilizou o PP e o PP_P , relatando que ambas as estimativas foram robustas e confiáveis para identificar as lacunas de produtividade.

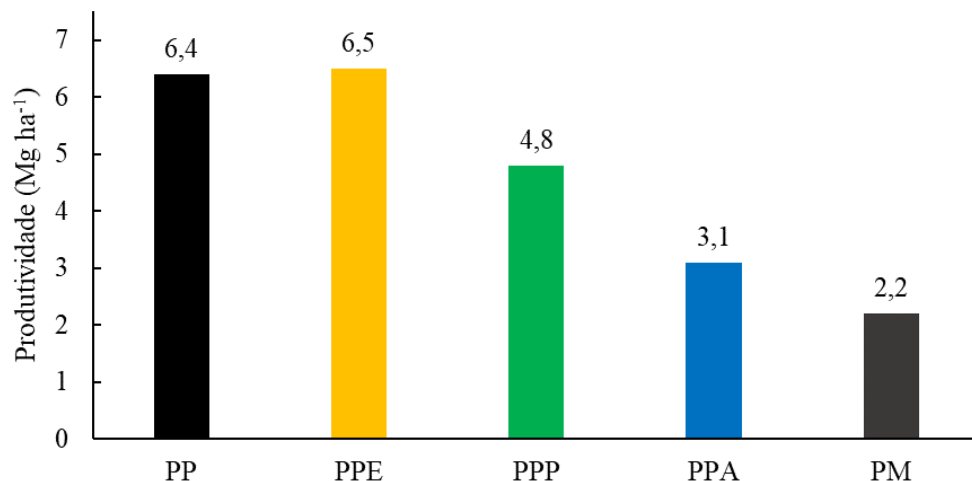


Figura 1010 - Potenciais de produtividade de soja em rotação com arroz irrigado no Rio Grande do Sul – Brasil. Coluna preta é o potencial de produtividade estimado pelo modelo (PP), coluna amarela é o potencial de produtividade por experimentos (PPE), coluna verde é o potencial de produtividade pelos melhores produtores (PPP), coluna azul é o potencial limitado por água (PPA) estimado pelo modelo e a coluna cinza produtividade média (PM) do RS nos últimos 11 anos (2009 – 2020).

O potencial de produtividade limitado por água médio do RS (2004 – 2019) foi de 2,7 a 3,4 Mg ha⁻¹, com um desvio padrão de 2,5 Mg ha⁻¹, demonstrando a grande variabilidade interanual presente no RS, resultante principalmente da quantidade de precipitação e sua distribuição durante a estação de cultivo. A produtividade média do RS durante os últimos 11 anos (2009 – 2020) foi de 2,2 Mg ha⁻¹ (IRGA, 2019), esses baixos valores evidenciam a grande lacuna para ser explorada.

Neste estudo, quatro lacunas de produtividade foram geradas a partir dos diferentes potenciais de produtividades, a primeira foi a maior lacuna (4,2 Mg ha⁻¹ ou 66%) que comparou a PP em relação a PM (lacuna = PP-PM), a segunda lacuna a comparação foi feita entre a PP_E e a PM (lacuna = PP_E -PM) cujo valor encontrado foi de 4,3 Mg ha⁻¹ ou 66% e a terceira lacuna que foi a menor (2,5 Mg ha⁻¹ ou 54%) foi feita a comparação entre a PP_P e a PM (lacuna = PP_P -PM) (Figura 10). Nos Estados Unidos, Lobell et al. (2009) identificaram lacunas de produtividade que variaram de 20 à 80%, o que confirma que os valores encontrados neste trabalho estão dentro da faixa reportada na literatura para diferentes culturas. Além disso, é possível inferir que a produtividade de soja em rotação com arroz irrigado no Rio Grande do Sul apresenta uma grande lacuna a ser explorada até atingir os valores de 80% do PP, valor citado por Van Ittersum e Rabbinge (1997) como sendo o ponto de máxima eficiência econômica, as quais são realidade em países desenvolvidos com alta tecnificação e intensificação dos sistemas produtivos (CASSMAN, 1999; CASSMAN et al., 2003; VAN ITTERSUM; RABBINGE, 1997).

A quarta lacuna de produtividade criada a partir da comparação entre PPA e a PM (lacuna = PPA-PM) alcançou valor de 0,9 Mg ha⁻¹ ou 29% (Figura 10), tal lacuna é a mais realística para o Rio Grande do Sul, uma vez que apenas 5% das áreas cultivadas com a cultura da soja apresentam irrigação complementar. Na Argentina, Merlos et al. (2015) estimaram uma PPA de 3.9 Mg ha⁻¹ e uma lacuna de 32% (1,2 Mg ha⁻¹), já nos Estados Unidos, Edreira et al. (2017) reportaram uma PPA superior (4,8 Mg ha⁻¹) em relação a encontrada na Argentina, e uma lacuna de 13% (0,6 Mg ha⁻¹). Os valores reportados na literatura se aproximam com os encontrados neste estudo mostrando que o principal limitante na produtividade do RS é o déficit hídrico (SENTELHAS et al., 2015), o qual é responsável por uma lacuna de 2,7 Mg ha⁻¹, ou seja 41% do PP. No entanto, na análise da lacuna do manejo foi obtida uma lacuna de 1,4 Mg ha⁻¹ ou 21%, tal lacuna foi decorrente de fatores principais como: época de semeadura e GMR (ZANON et al., 2016; ZANON et al., 2018), densidade de plantas (CORASSA et al., 2018) e

características físico-químicas do solo.

3.3 FATORES CAUSADORES DAS LACUNAS DE PRODUTIVIDADE EM LAVOURAS DE SOJA NO RIO GRANDE DO SUL

A análise dos questionários aplicados em 159 lavouras em quatro anos agrícolas (2015-2019), referente às práticas de manejo permitiu apontar variáveis que potencialmente explicam as lacunas de produtividade do Rio Grande do Sul. Diferença entre as lavouras de altas produtividades e baixas produtividades foram estatisticamente significativas ($p < 0,01$) para as variáveis relacionadas à cultura: data de semeadura, grupo de maturidade relativa, data de florescimento, dose de fósforo (P) aplicado na base, número de aplicação de fungicidas e inseticidas, resultados estão de acordo com Zanon et al., (2016) que relata a época de semeadura como um fator limitante de produtividade (Tabela 3).

Tabela 3 - Variáveis que explicam as lacunas de produtividades das lavouras de soja em rotação com arroz irrigado no Rio Grande do Sul. AP = altas produtividades (tercil superior das produtividades), BP = baixas produtividades (tercil inferior produtividades) e n = número de questionários analisados.

Variáveis	Unidade	n	AP	BP	AP-BP	
Características do solo						
Camada Compactada	%	64	42	58	-16	ns
Irrigação	%	12	50	50	0	ns
Calcário	%	98	52,0	48,0	4	ns
Mecanismo						
Subsolador	%	26	58	42	15,4	ns
Disco Turbo	%	29	41	59	-17,2	ns
Haste Sulcadora	%	19	58	42	15,8	ns
Disco Liso	%	9	33	67	-33,3	ns
Nenhum	%	20	45	55	-10,0	ns
Cultura de verão antecedente						
Soja	%	35	40	60	-20	**
Arroz	%	63	49	51	-2	ns
Cultura de Inverno antecedente						
Azevém	%	32	44	56	-12	ns
Azevém + Aveia	%	14	29	71	-42	ns
Aveia	%	4	50	50	0	ns
Pousio	%	50	46	54	-8	ns
Preparo do Solo						
1	%	22	36	64	-27	ns
2	%	25	56	44	12	ns
3	%	29	48	52	-3	ns
4	%	32	50	50	0	ns
Tecnologia Semente						
RR	%	68	40	60	-20	**
IPRO	%	43	60	40	20	**
Manejo da Cultura						
Grupo de Maturação	.	109	6,3	6,4	-0,1	**
Data de semeadura	DJ	91	310	327	-16	*
Adubação na Base	Kg/ha	105	240	224	16	ns
Fertilizante N Base	Kg/ha	101	14	11	3	ns
Fertilizante P Base	Kg/ha	101	76	63	13	*
Fertilizante K Base	Kg/ha	101	35	44	-9	ns
Fertilizante K Cobertura	Kg/ha	63	83	68	15	**
Fungicidas	n	104	3,0	2,3	0,7	*
Inseticidas	n	104	3,6	3,0	0,6	**
Herbicidas	n	106	2,8	2,1	0,7	*
Mecanismos de Herbicidas	n	106	1,6	1,3	0,3	*
Pré-Emergente	%	19	73,7	26,3	47,4	**
Produtividade	Kg/ha	114	3580	1860	1720	*

Uma árvore de regressão foi criada e dividida em níveis de produtividade (alto e baixo) e cinco variáveis explicaram 60% (altas produtividades) e 40% (baixas produtividades) a variação de produtividade, sendo elas: data de semeadura, adubação fosfatada, número de mecanismos de herbicidas utilizados, grupo de maturação das cultivares, aplicação de potássio em cobertura, preparos de solo e adubação total na base (Figura 11).

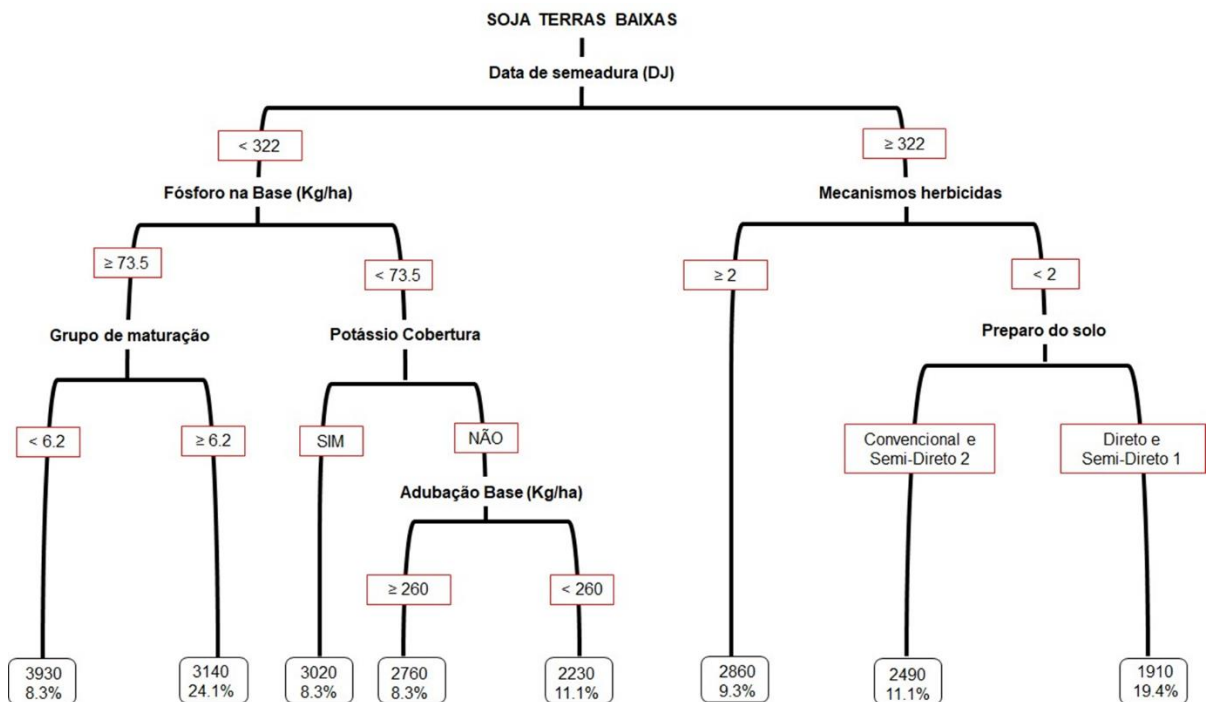


Figura 11 - Modelo de árvore de regressão mostrando fontes de variação na produtividade de grãos devido aos fatores biofísicos e de manejo. Caixas são nós de divisão, com caixas inferiores representando nós de terminal. Os valores dentro de cada nó terminal indicam a média da produção de grãos (em kg ha^{-1}) com base em 13% de umidade e a porcentagem de observações em cada nó terminal.

Destaca-se que, a data de semeadura foi variável mais importante na divisão dos dois níveis de produtividade onde as produtividades mais elevadas foram obtidas em semeaduras antes de 17/11 (DJ 322). Estas semeaduras até 17/11 apresentaram maior coeficiente fototérmico, o que resultou em maiores produtividades (ZANON et al., 2016). Lavouras com maiores produtividades também estão associadas a maiores adubações, em especial de fósforo. Apesar do constante incremento de adubação para obtenção de maiores produtividades na lavoura de arroz, essa demanda ainda está aquém de suprir toda a extração e elevar os teores do solo (MENEZES et al., 2012). Grande parte dessa realidade se deve ao fato de que áreas inundadas durante o cultivo de arroz, apresentam uma dinâmica de disponibilidade do nutriente

mais favorável enquanto o solo encontra-se saturado, porém quando a soja cultivada nessas áreas a baixa disponibilidade do nutriente acarreta limitações na produtividade.

Um dos princípios do manejo integrado de plantas daninhas é a utilização de herbicidas com diferentes mecanismos de ação. O herbicida glifosato, desde a introdução dos genes de resistência em soja (*Roudup Ready*®) é o herbicida mais utilizado no cultivo, tanto em terras altas como em terras baixas, porém seu uso recorrente e diminuição na utilização de outros mecanismos acarreta em plantas daninhas resistentes ao grupo químico, dificultando o manejo das áreas. A utilização de mais mecanismos de ação foi apontada como um dos fatores que estão relacionados as lavouras de maiores produtividades. Nesse grupo, destaca-se a utilização dos herbicidas pré-emergentes que também foi apontado como um fator correlacionado a lavouras de maiores produtividades. O herbicida pré-emergente s-metolachlor é o maior representante desse grupo e apresenta eficiência controle de arroz daninho além de outras poáceas que já adquiriram resistência a outros grupos químicos. Além da diversificação de mecanismos de ação o sistema de cultivo também é grande aliado ao manejo integrado de plantas daninhas, priorizando práticas que minimizem o período de solo exposto e sem cobertura.

4 CONCLUSÃO

As principais informações deste estudo com foco no potencial e lacunas de produtividade de soja foram:

(I) o potencial de produtividade variou de 6,8 a 6,3 Mg ha⁻¹ nas diferentes regiões e de 3,4 à 2,5 para o PPA, sendo o PPA médio do estado 6,4 Mg ha⁻¹ e o PPA médio de 3,1 Mg ha⁻¹;

(II) a lacuna causada pela deficiência hídrica (%DHPPP) variou de 47 a 62% do PP (3,0 a 4,1 Mg ha⁻¹) nas diferentes regiões e a lacuna causada pelo manejo variou de 9 a 39% do PP (0,6 à 2,7 Mg ha⁻¹), sendo a lacuna média do estado oriunda da %DHPPP igual a 52,6% (3,3 Mg ha⁻¹) e a lacuna de manejo igual à 21% (1,4 Mg ha⁻¹);

(III) a época de semeadura foi o principal fator causador da lacuna de manejo e juntamente com adubação, preparo de solo e manejo integrado de plantas daninhas.

REFERÊNCIAS

- BREIMAN, L., Friedman, J., Olshen, R., Stone, C., 1984. Classification and Regression Trees. Wadsworth, Belmont, CA. Clark, L.A., Pregibon, D., 1992. Tree- based models. In: Chambers, J.M., Hastie, T.J. (Eds.), **Statistical Models in S. Wadsworth**.
- Bortoluzzi, M. P., A. B. Heldwein, R. Trentin, D. D. P. Lucas, E. Z. Righi, and M. Leonardi, 2017: Risk of water surplus in soybean crop on haplic planosol soil in the Central Depression of Rio Grande do Sul State, Brazil. *Cienc. Rural*, 47, 2016.
- Bortoluzzi, M. P., Heldwein, A. B., Trentin, R., Nied, A. H., da Silva, J. R., & da Rocha, L. (2020). ADJUSTMENT OF PROBABILITY FUNCTIONS TO WATER EXCESS AND DEFICIT IN SOYBEANS CULTIVATED IN LOWLAND SOILS. *IRRIGA*, 25(2), 402-419.**
- CASSMAN, K.G. et al. Meeting cereal demand while protecting natural resources and improving environmental quality. **Ann. Rev. Environ. Resour.** v.28, p.315–358, 2003.
- CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Soja - Brasil: **Série histórica de área plantada e de produtividade**. Brasília, 2020. Online. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras>>. Acesso em: 10 de out. de 2020.
- CORASSA, G. M. et al. Optimum soybean seeding rates by yield environment in southern Brazil. **Agronomy Journal**, [s. l.], v. 110, n. 6, p. 2430–2438, 2018.
- EDREIRA, J. I. R. et al. Assessing causes of yield gaps in agricultural areas with diversity in climate and soils. **Agricultural and Forest Meteorology**, [s. l.], v. 247, n. July, p. 170–180, 2017.
- GRASSINI, P. et al. How good is good enough? Data requirements for reliable crop yield simulations and yield-gap analysis. **Field Crops Research**, [s. l.], v. 177, p. 49–63, 2015a.
- GRASSINI, P. et al. Soybean yield gaps and water productivity in the western U.S. Corn Belt. **Field Crops Research**, [s. l.], v. 179, p. 150–163, 2015b..
- LOBELL, D. B.; CASSMAN, K. G.; FIELD, C. B. Crop Yield Gaps: Their Importance, Magnitudes, and Causes. **Annual Review of Environment and Resources**, [s. l.], v. 34, n. 1, p. 179–204, 2009.
- SENTELHAS, P. C. et al. The soybean yield gap in Brazil - Magnitude, causes and possible solutions for sustainable production. **Journal of Agricultural Science**, [s. l.], v. 153, n. 8, p. 1394–1411, 2015.
- THERNEAU, T.M., ATKINSON, E.J. An Introduction to Recursive Partitioning Using the RPART Routine. Technical Report 61, Mayo Clinic, **Section of Statistics**, 1997.
- VAN ITTERSUM A, M.K. et al. Yield gap analysis with local to global relevance - A review. **Field Crops Research**, v.143, p.4–17, 2013.

VAN ITTERSUM, M.K. & RABBINGE, R. Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations. **Field Crops Research**, v. 52, p. 197–208, 1997.

VAN OORT, P. A. J. et al. Can yield gap analysis be used to inform R&D prioritisation? **Global Food Security**, [s. l.], v. 12, n. July 2016, p. 109–118, 2017.

VENABLES, W.N., RIPLEY, B.D. *Modern Applied Statistics With S*, fourth edition. **Springer-Verlag**, Fourth edition, Springer, New York, 2002.

ZANON, A. J.; STRECK, N. A.; GRASSINI, P. Climate and management factors influence Soybean yield potential in a subtropical environment. **Agronomy Journal**, [s. l.], v. 108, n. 4, p. 1447–1454, 2016.

3.4 DISCUSSÃO

A soja cultivada em rotação com arroz irrigado apresenta limitações para atingir os potenciais de produtividade relacionadas ao excesso e déficit hídrico. Essas ocorrências são perceptíveis até mesmo em nível experimental, onde o controle e manejo da área é o mais próximo ao ideal. Ainda assim, em todos os níveis de produtividades (potencial, potencial limitado por água, experimental e lavouras comerciais) foram encontrados valores tão elevados quanto aqueles obtidos em áreas de terras altas (ZANON et al, 2016), mas em áreas de rotação com arroz irrigado as condições tornam-se mais específicas de manejo de solo, faixa específica de GMRs e um período mais curto de semeadura que permite essas obtenções de altas produtividades ao mesmo que também diminuí os riscos.

Um dos trabalhos mais bem sucedidos de transferência de informação no campo para elevar a produtividade de uma cultura agrícola foi realizado com a cultura do arroz irrigado no estado do Rio Grande do Sul (Projeto 10 e Projeto 10+), esse projeto tinha como um dos seus pilares a antecipação das datas de semeadura para que permitisse o máximo aproveitamento dos elementos ambientais pela planta. Para conseguir esse ajuste de manejo todo o sistema de produção teve que ser trabalhado e ajustado. A relação da época de semeadura na produtividade do arroz é um pouco mais direta do que na soja, pois trata-se de uma cultura que apresenta grande parte de seu desenvolvimento regulado pela soma térmica e um período reprodutivo muito definidos ao longo do ciclo onde é extremamente responsivos a radiação solar (SETIYONO et al., 2007).

Na cultura da soja, em maior parte sem irrigação, ocorre uma complexa interação entre fotoperíodo, temperatura e disponibilidade hídrica (SETIYONO et al., 2011) tornando essa resposta a época de semeadura, teoricamente não tão direta quando para o arroz irrigado, porém trabalhando com um banco de dados robusto em níveis de modelagem, experimental e de lavouras foi possível determinar uma época de semeadura onde é possível não somente atingir potenciais de produtividade como também reduzir os riscos por déficits e especialmente excessos hídricos (Figura 2).

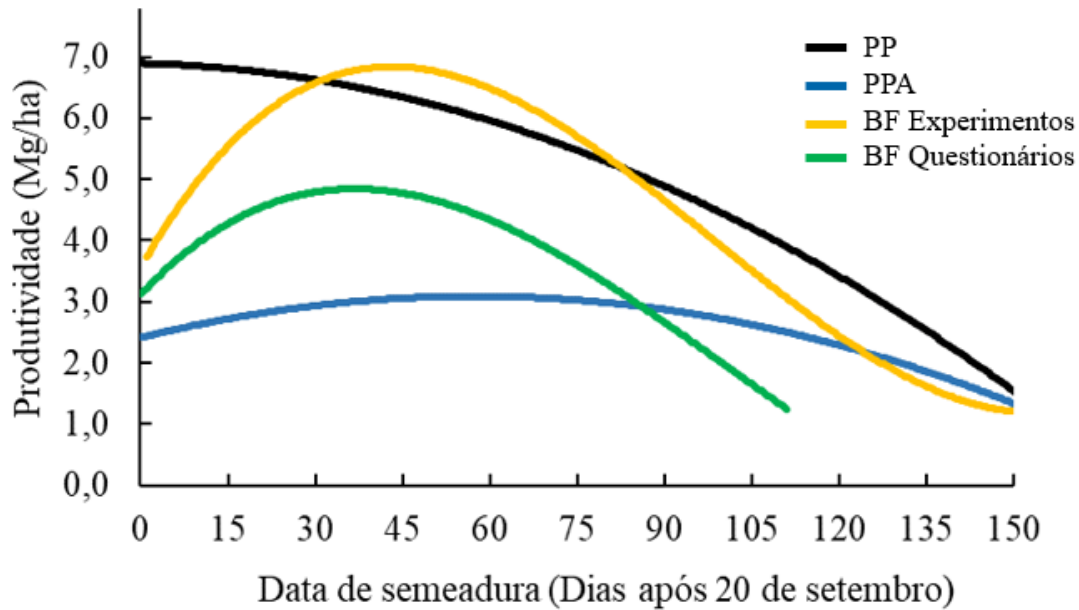


Figura 2 - Níveis de produtividades (Potencial, Boudary Function Experimental, Boundary Function das lavouras acompanhadas e produtividade média) para a soja em rotação com o arroz irrigado em função da data de semeadura a partir do dia 20 de Setembro no estado do Rio Grande do Sul.

O período compreendido entre 20 de outubro e 15 de novembro permite expressão do potencial da soja em rotação com o arroz irrigado. Em terras altas para latitudes semelhantes no Rio Grande do Sul podemos atingir asse potencial entre 20 de setembro e 4 de novembro, com queda no potencial ocorrendo após esse período (ZANON et al., 2016).

Em terras baixas as condições de umidade do solo excessiva até 20 de outubro e os riscos de excessos hídricos dificultam essa expressão no período inicial e as quedas diárias nos potenciais de produtividades ocorridas após 15 de novembro são ainda maiores do que em terras altas. Conforme nos afastamos dessas datas, aumentam as lacunas de produtividade em relação a produtividade potencial.

O curto período que compreende as datas ideais de semeadura refletem uma das limitações em muitas propriedades para obtenção de altas produtividades de soja em rotação com arroz irrigado que é a questão operacional. Questões como adubação, manejo integrado de plantas daninhas, necessidade de utilizar mecanismos rompedores da camada compacta do solo, drenagens eficientes também estão diretamente relacionados aos fatores que causam a lacuna de produtividade nessas áreas e que necessitam serem trabalhados para diminuir a lacuna e elevar a produtividade média nesse importante sistema de produção agrícola.

4 CONCLUSÃO

As produtividades de soja em rotação com arroz irrigado podem atingir os mesmos patamares de produtividades obtidas em áreas de terras altas.

Época de semeadura, adubação, preparo do solo e manejo integrado de plantas daninhas são fatores que precisam ser trabalhados para diminuir as lacunas de produtividade da soja em rotação com arroz irrigado.

REFERÊNCIAS

- AGOSTINETTO, D.; FLECK, N. G.; RIZZARDI, M. A.; MEROTTO JUNIOR, A.; VIDAL, R. A. Arroz Vermelho: Ecofisiologia e estratégias de controle. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 31, n.2, p. 341-349, 2001.
- ALLIPRANDINI, L. F. et al. Understanding soybean maturity groups in Brazil: Environment, cultivar classification, and stability. **Crop Science**, [s. l.], v. 49, n. 3, p. 801–808, 2009.
- ASFAW, A. et al. AMMI and SREG GGE biplot analysis for matching varieties onto soybean production environments in Ethiopia. **Scientific Research and Essay**, v.4, p.1322-1330, 2009.
- BATTISTI, R. et al. Assessment of soybean yield with altered water-related genetic improvement traits under climate change in Southern Brazil. **European Journal of Agronomy**, [s. l.], v. 83, p. 1–14, 2017.
- BATTISTI, R. et al. Soybean Yield Gap in the Areas of Yield Contest in Brazil. **International Journal of Plant Production**, [s. l.], v. 12, n. 3, p. 159–168, 2018.
- BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C. Drought Tolerance of Brazilian Soybean Cultivars Simulated By a Simple Agrometeorological Yield Model. **Experimental Agriculture**, [s. l.], v. 51, n. 2, p. 285–298, 2015.
- BERNARDES, B.C. **Exigências de rotações, soja, feijão miúdo**. In: Melhoria da rizicultura do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Secretária da Agricultura, Indústria e Comércio, 1945. p. 93-185.
- BOOTE, K.J.; MÍNGUEZ, M.I.; SAU, F. Adapting the CROPGRO legume model to simulate growth of faba bean. **Agronomy Journal**, v.94, p.743–756, 2002.
- BORGES, J.R. et al. Resistência à penetração de um gleissolo submetido a sistemas de cultivo e culturas. **Revista Brasileira de Agrociência**, v.10, n.1, p. 83-86, 2004.
- CERA, J. C. et al. Extending the evaluation of the SoySim model to soybean cultivars with high maturation groups. **Field Crops Research**, v. 201, n. 1, p. 162-174, 2017a.
- CERA, J. C. et al. Produtividade de soja em cenários climáticos futuros para o Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 52, n. 6, p. 380-392, 2017b.
- CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Soja - Brasil: **Série histórica de área plantada e de produtividade**. Brasília, 2020. Online. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras>>. Acesso em: 10 de out. de 2020.
- CUNHA, G. R. Zoneamento agrícola e época de semeadura para soja no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Passo Fundo, v.9, n.3, p.446-459, 2001.
- DA ROCHA, T. S. M. et al. Performance of soybean in hydromorphic and nonhydromorphic soil under irrigated or rainfed conditions. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s. l.], v. 52, n. 5, p. 293–302, 2017.

EDREIRA, J. I. R. et al. Assessing causes of yield gaps in agricultural areas with diversity in climate and soils. **Agricultural and Forest Meteorology**, [s. l.], v. 247, n. July, p. 170–180, 2017.

FARIAS, J. R. B.; NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A. L.. Soja. In: MONTEIRO, J. E. B. A. et al. **Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola**. INMET – Instituto Nacional de Meteorologia, 2009. p.109-130. 2009.

FENSTERSEIFER, C. A. et al. On the number of experiments required to calibrate a cultivar in a crop model: The case of CROPGRO-soybean. **Field Crops Research**, v. 204, p. 146-152, 2017.

FERMONT, A. M. et al. Closing the cassava yield gap: an analysis from small holder farms in East Africa. **Field Crops Research**, v. 112, p. 24–36, 2009.

GLOBAL YIELD GAP ATLAS. **Global Yield Gap and Water Productivity Atlas**, 2016. Disponível em: <http://www.yieldgap.org/>. Acesso:19 de janeiro de 2020.

GRASSINI, P et al. Drivers of spatial and temporal variation in soybean yield and irrigation requirements. **Field Crops Research**, v. 163, p. 32–46, 2014.

GRASSINI, P. et al. How good is good enough? Data requirements for reliable crop yield simulations and yield-gap analysis. **Field Crops Research**, [s. l.], v. 177, p. 49–63, 2015a.

GRASSINI, P. et al. Soybean yield gaps and water productivity in the western U.S. Corn Belt. **Field Crops Research**, [s. l.], v. 179, p. 150–163, 2015b.

GUILPART, N. et al. Estimating yield gaps at the cropping system level. **Field Crops Research**, [s. l.], v. 206, p. 21–32, 2017.

HOOGENBOO, M.G et al. **Decision support system for agrotechnology transfer version 4.0**. University of Hawaii, Honolulu, HI (CD-ROM). 2004.

IRGA. Levantamento de área semeada com soja em terras baixas no Rio Grande do Sul, 2020.

IRGA. Soja 6000: Manejo para alta produtividade em terras baixas. Porto Alegre: Gráfica e Editora RJR, 2018.

JONES, J.W et al. The DSSAT cropping system model. **European Journal of Agronomy**, v.18, p. 235–265, 2003.

KANTOLIC, A. Control ambiental y genético de la fenología del cultivo de soja: impactos sobre el rendimiento y la adaptación de genótipos. **Revista da Facultad de Agronomía UBA**, v. 28, n. 1, p. 63-88, 2008.

LOBELL, D. B.; CASSMAN, K. G.; FIELD, C. B. Crop Yield Gaps: Their Importance, Magnitudes, and Causes. **Annual Review of Environment and Resources**, [s. l.], v. 34, n. 1, p. 179–204, 2009.

MALL, R. K. et al. Mitigating climate change impact on soybean productivity in India: a simulation study. **Agricultural and Forest Meteorology**. v.121, p.113-125, 2004.

MARCHESAN, E. **Produção e fixação de flores e legumes, por nó do caule e dos ramos, em três cultivares de soja**. 1982. 105 f. Dissertação de Mestrado-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1982.

MARCHESAN, E. et al. Adubação foliar com micronutrientes em arroz irrigado, em área sistematizada. **Ciência Rural**. v. 31, n. 6, p. 941-945. 2001.

MARCOLIN, et al. **Produtividade e eficiência de uso de água em função de sistemas de manejo da irrigação em arroz irrigado** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 7, 2011, Balneário Camboriú, SC. Anais... Itajaí: Epagri/Sosbai, 2011. p. 335-338.

MARTIGNONE, R. et al. Efecto de la fecha de siembra sobre el comportamiento fenológico y agronómico en cultivares de soja de diferentes grupos de maduración. In: Anais 3º Congreso Soja del Mercosur, Rosario, p. 47-50, 2006.

MERLOS, F. A. et al. Potential for crop production increase in Argentina through closure of existing yield gaps. **Field Crops Research**, [s. l.], v. 184, p. 145–154, 2015.

QIAN, B. et al. Comparing simulated crop yields with observed and synthetic weather data. **Agricultural and Forest Meteorology**. v.151, p.1781-1791, 2011.

SARTORI, G. M. S. et al. Sistemas de preparo do solo e de semeadura no rendimento de grãos de soja em área de várzea. **Ciência Rural**. Santa Maria, v. 46, n. 3, p. 492-498. 2016.

SETIYONO, T. D. et al. Understanding and modeling the effect of temperature and daylength on soybean phenology under high-yield conditions. **Field Crops Research**, [s. l.], v. 100, n. 2–3, p. 257–271, 2007.

SETIYONO, T.D et al. Simulation of soybean growth and yield in near-optimal growth conditions. **Field Crops Research**, v.119, p.161-174, 2010.

SILVA, F. C.; BERGAMASCO, A. F. Levantamento de modelos matemáticos descritos para a cultura da cana-de-açúcar. **Revista Biociência**, Taubaté, v.7, n.1, p.7-14, 2001.

SINCLAIR, T. R. Water and nitrogen limitations in soybean grain production I. Model development. **Field Crops Research**, [s. l.], v. 15, n. 2, p. 125–141, 1986.

STRECK, E. V. et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: UFRGS, 2008. 222p.

STRECK, N.A. et al. Improving predictions of developmental stages in winter wheat: a modified Wang and Engel model. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.115, p.139-150, 2003.

TEIXEIRA, W. W. R. et al. Uncertainty assessment of soya bean yield gaps using DSSAT-CSM-CROPGRO-Soybean calibrated by cultivar maturity groups. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 205, p. 533-544, 2019.

VAN ITTERSUM A, M.K. et al. Yield gap analysis with local to global relevance - A review. **Field Crops Research**, v.143, p.4–17, 2013.

VAN ITTERSUM, M.K. & RABBINGE, R. Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations. **Field Crops Research**, v. 52, p. 197–208, 1997.

VERA-DIAZ, M. C. et al. An interdisciplinary model of soybean yield in the Amazon Basin: The climatic, edaphic, and economic determinants. **Ecological Economics**. V.65, n.2, p.420-431, 2008.

VILA, S.C.C.; MARCHEZAN, E.; AVILA L.A.; MASSONI, P.F.S.; TELO, G.M.; MACHADO, S.L.O.; CAMARGO, E.R. Arroz tolerante a imidazolinonas: controle do arroz-vermelho, fluxo gênico e efeito residual do herbicida em culturas sucessoras não-tolerantes. **Planta Daninha**, v. 24, n. 4, p. 761-768, 2006.

PINTO, L.F.S.; LAUS NETO, J.A.; PAULETTO, E.A. Solos de várzea do Sul do Brasil cultivados com arroz irrigado. In: GOMES, A.S.; MAGALHÃES, A.M. Arroz Irrigado no Sul do Brasil. Brasília : Embrapa, 2004. cap.3, p.75-96.

YAN, W. GGE biplot – a Windows application for graphical analysis of multienvironment trial data and other types of two-way data. **Agronomy Journal**, v.93, p.1111-1118, 2001.

ZANON, A. J. et al. **Ecofisiologia da soja**: visando altas produtividades. 1.ed. Santa Maria: Ed. GR, 2018. 136 p.

ZANON, A. J.; STRECK, N. A.; GRASSINI, P. Climate and management factors influence Soybean yield potential in a subtropical environment. **Agronomy Journal**, [s. l.], v. 108, n. 4, p. 1447–1454, 2016.

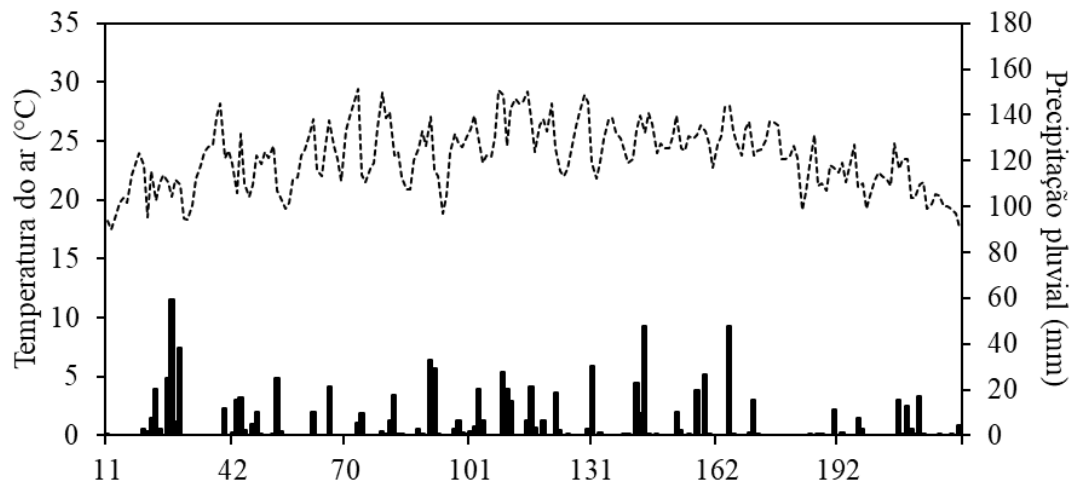
ZDZIARSKI, A.D. et al. Key soybean maturity groups to increase grain yield in Brazil. **Crop Science**, v. 57, p. 1155-1165, 2018.

ANEXOS

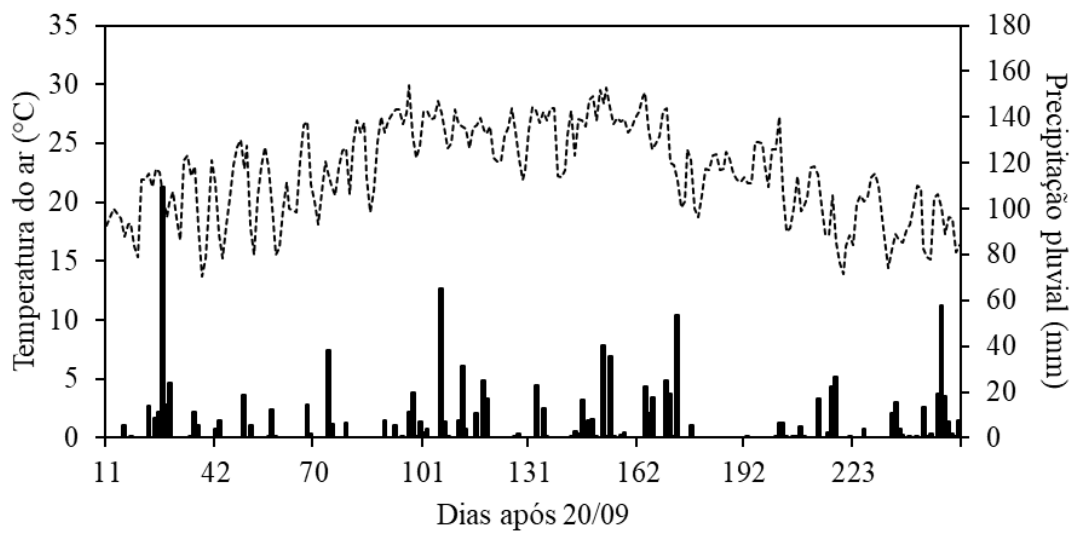
ANEXO 1

Cachoeirinha - RS

2014-2015



2016-2017

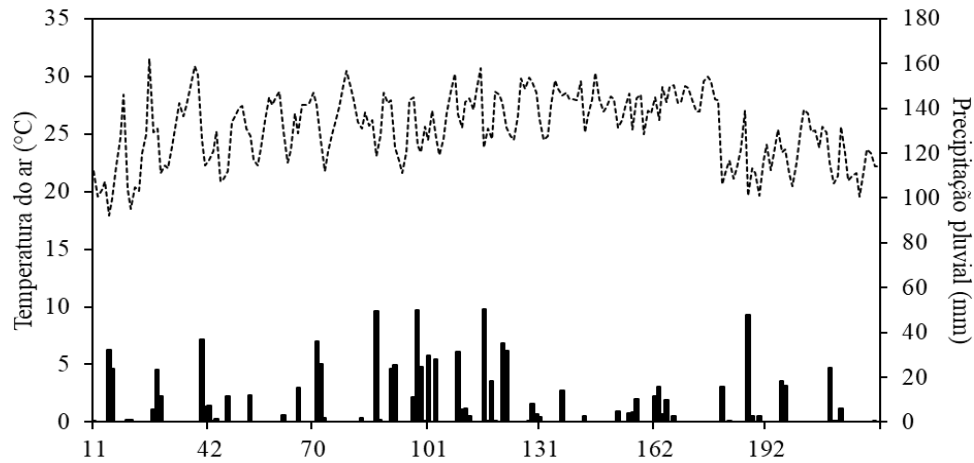


■ Precipitação - - - - - Tmed

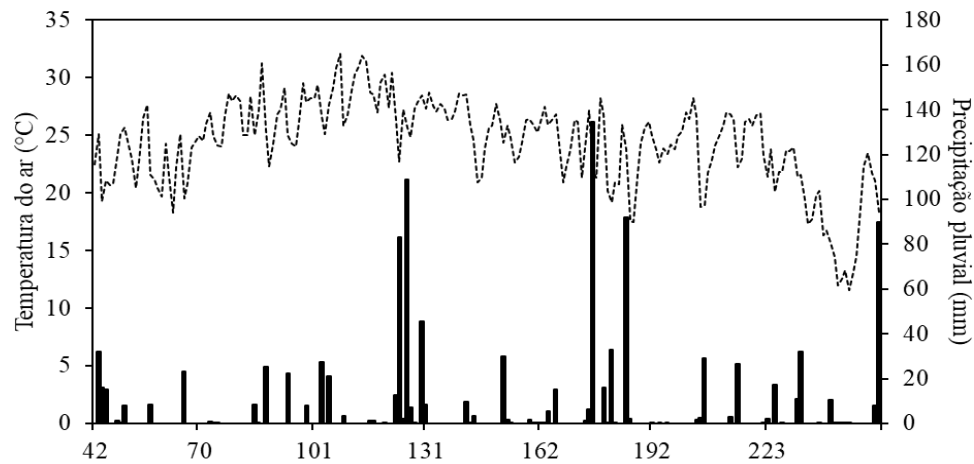
Figura 11 - Precipitação pluvial (mm) e temperatura média do ar (°C) para os anos agrícolas 2014/2015 e 2016/2017. Cachoeirinha, Rio Grande do Sul, Brasil

Itaqui - RS

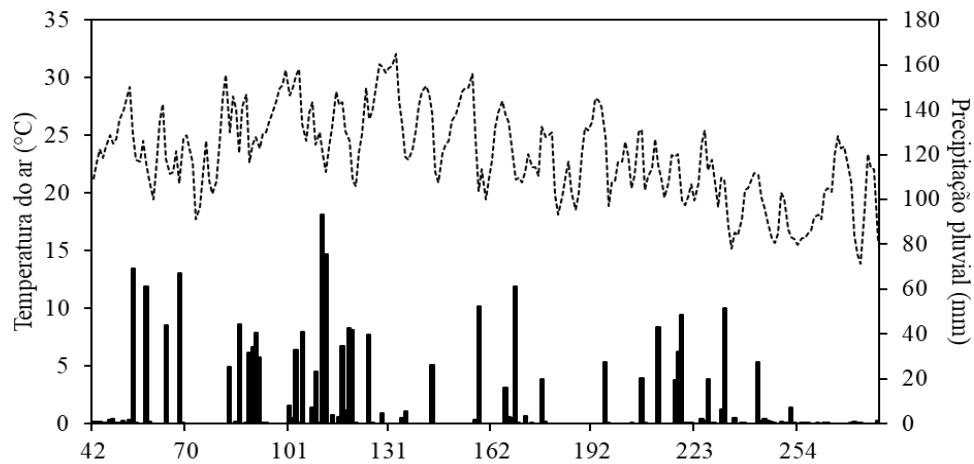
2014-2015



2017-2018



2018-2019

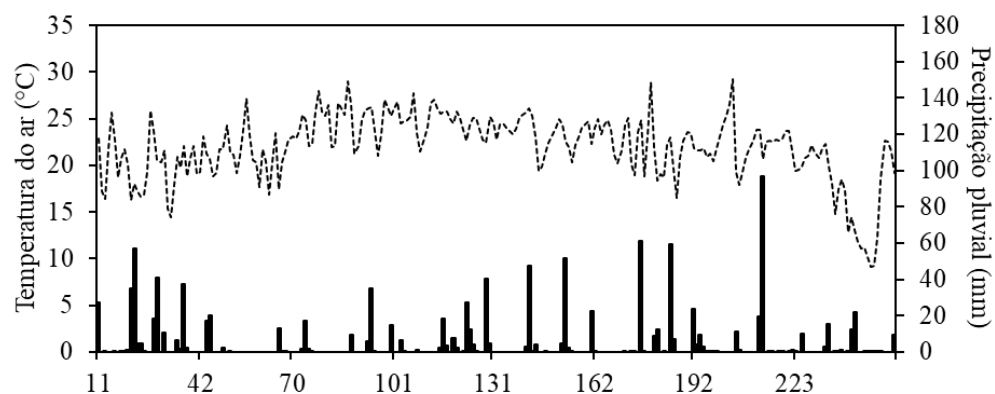


■ Precipitação - - - - - Tmed

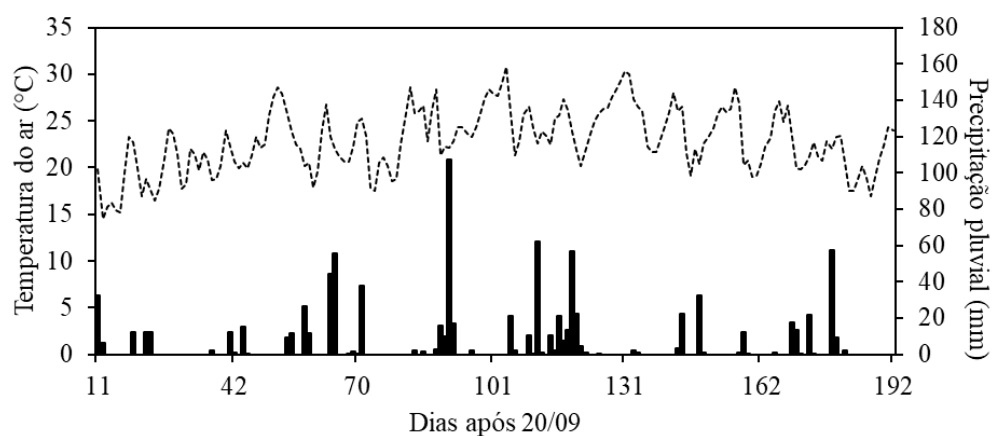
Figura 12- Precipitação pluvial (mm) e temperatura média do ar (°C) para os anos agrícolas 2014/2015, 2017/2018 e 2018/2019. Itaqui, Rio Grande do Sul. Brasil

Santa Maria - RS

2017-2018



2018-2019



■ Precipitação - - - - - Tmed

Figura 13 - Precipitação pluvial (mm) e temperatura média do ar (°C) para os anos agrícolas 2017/2018 e 2018/2019. Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil.

Santa Vitória do Palmar - RS 2014-2015

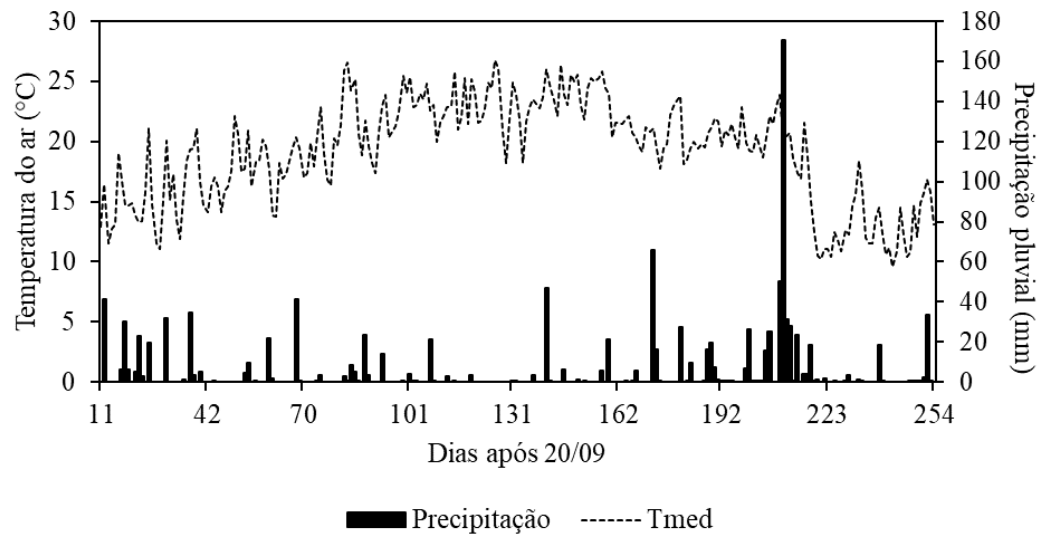
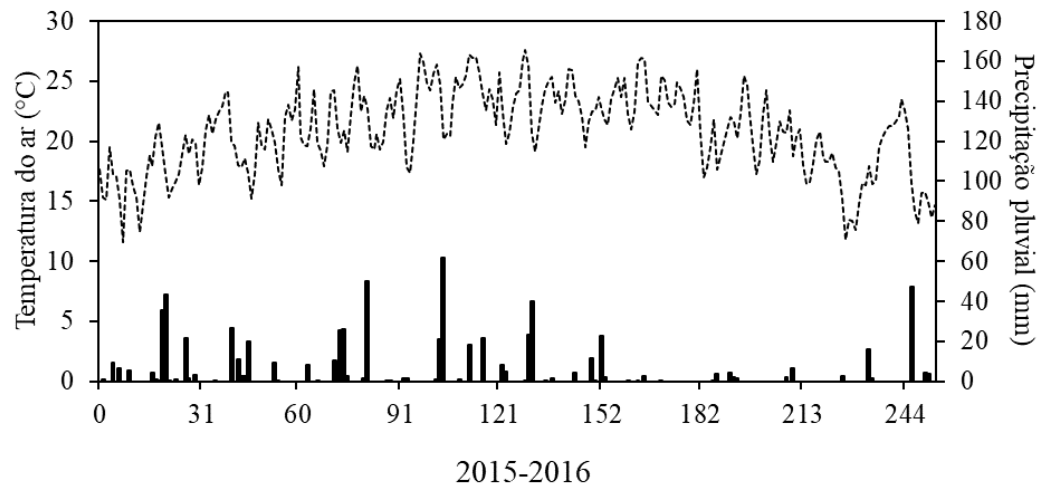


Figura 15 - Precipitação pluvial (mm) e temperatura média do ar (°C) para os anos agrícolas 2014/2015 e 2015/2016. Santa Vitória do Palmar, Rio Grande do Sul, Brasil.

ANEXO 2

Questionário**PROJETO LACUNA DE PRODUTIVIDADE DE
SOJA EM ROTAÇÃO COM ARROZ IRRIGADO****IDENTIFICAÇÃO DO ENTREVISTADOR:**

1 Nome: _____

2 - Contato telefônico e e-mail: _____

3 – Município: _____

4 – Instituição: _____

DADOS GERAIS DO PRODUTOR:

1 - Nome do produtor rural: _____

2- Telefone do produtor: (____) _____

2 - Município: _____

Dados da lavoura de soja (somente da área/talhão que será avaliada):OBS: A LAVOURA ACOMPANHADA DEVERÁ TER SOMENTE UMA CULTIVAR E
MESMO MANEJO.

1 - Tamanho da lavoura (ha): _____

1.1

Latitude da Lavoura:

Graus (°) Minutos (') Segundos (")

Longitude da lavoura:

Graus (°) Minutos (') Segundos (")

1.2 - Qual (is) o (s) motivo (s) que determinaram o cultivo de soja na área?

- Rentabilidade e mercado
- Liquidez e fluxo de caixa
- Alta infestação de plantas daninhas e necessidade de reduzir o banco de sementes
- Aptidão para o cultivo e estrutura da propriedade adequada
- Outro: _____

2 – Cultivar utilizada na lavoura: _____

3 – Data de semeadura: ____/____/____

3.1 - Houve atraso na semeadura em relação ao planejamento inicial?

- Sim Não

Em caso positivo (para mais de um fator enumerar a ordem de importância):

- Alta umidade no solo
- Baixa umidade no solo
- Operacional
- Foi priorizada a semeadura do arroz
- Atraso na retirada dos animais da pastagem

3.2 – Informar a data de ocorrência dos seguintes estágios de desenvolvimento:

3.2.1 Emergência: _____

3.2.2 Início do florescimento: _____

3.2.3 Início da formação de legumes “canivete”: _____

3.2.4 A lavoura faz parte do programa de Manejo Integrado de Pragas (MIP) da Emater/RS-ASCAR:

- Sim Não

4 – Semeadura - Densidade:

Entre linha: _____ cm

Semeadura: _____ sementes/metro linear

População estabelecida: _____ plantas/metro linear

5 – Utiliza semente certificada?

() Sim () Não

6 – Qual é o sistema de preparo de solo na área:

() Direto (Não revolve o solo no verão e inverno). Quantos anos sem revolver o solo: _____

() Semi – direto 1 (Revolve o solo somente após a colheita da cultura anterior)

() Semi – direto 2 (Revolve o solo somente antes da sementeira da soja)

() Convencional (Revolve o solo após a colheita e antes da sementeira)

7 – Histórico da Lavoura/Talhão:

		Cultura	Finalidade	Adubação	Produtividade (kg/ha ou Sacas/ha)
2014/2015	Outono/Inverno	() Azevém () Aveia () Aveia + Azevém () Pousio () Outro: _____	() Grão () Pastejo () Corte para Feno/Silagem () Cobertura	() Sim () Não Quantidade: _____ Formula: _____	
	Primavera/Verão	() Arroz () Soja () Pousio () Outro: _____	() Grão () Pastejo () Corte para Feno/Silagem () Cobertura	() Sim () Não Quantidade: _____ Formula: _____	
2015/2016	Outono/Inverno	() Azevém () Aveia () Aveia + Azevém () Pousio () Outro: _____	() Grão () Pastejo () Corte para Feno/Silagem () Cobertura	() Sim () Não Quantidade: _____ Formula: _____	
	Primavera/Verão	() Arroz () Soja () Pousio () Outro: _____	() Grão () Pastejo () Corte para Feno/Silagem () Cobertura	() Sim () Não Quantidade: _____ Formula: _____	
2016/2017	Outono/Inverno	() Azevém () Aveia () Aveia + Azevém () Pousio () Outro: _____	() Grão () Pastejo () Corte para Feno/Silagem () Cobertura	() Sim () Não Quantidade: _____ Formula: _____	
	Primavera/Verão	() Arroz () Soja () Pousio () Outro: _____	() Grão () Pastejo () Corte para Feno/Silagem () Cobertura	() Sim () Não Quantidade: _____ Formula: _____	
2017	Outono/Inverno	() Azevém () Aveia () Aveia + Azevém () Pousio () Outro: _____	() Grão () Pastejo () Corte para Feno/Silagem () Cobertura	() Sim () Não Quantidade: _____ Formula: _____	

7.1 – Em caso de lavoura-pecuária, quantos dias antes da sementeira da soja é retirado o gado

da área: _____ dias.

7.2 Caso o produtor trabalhar com pastagens para produção de carne ou leite, qual a lotação média da área: _____ kg de boi ou vaca por hectare.

8 - A área é arrendada?

() Sim () Não

9 – A área é calcariada?

() Sim () Não

9.1 - Em caso positivo, faz aplicações de quanto em quanto tempo:

() todos os anos () dois em dois anos () três em três anos () mais de três anos

9.2 A dose é determinada por:

() Análise de solo

() Dose padrão. Dose (toneladas): _____

() Outro: _____

10 – O solo da lavoura apresenta camada compactada:

() Sim () Não

Se sim, qual a profundidade da camada compactada: _____ cm

11 - Utiliza escarificador e/ou subsolador:

() Sim () Não

12 - Utiliza algum mecanismo para o rompimento da camada compactada acoplado na semeadora?

() Haste sulcadora () Disco turbo () Disco liso () Nenhum

13 – Utiliza qual sistema de drenagem?

() Nenhum () Drenos convencionais () Drenos RTK () Camalhão ou sulco

() Outro: _____

13.1 - O sistema de drenagem é:

() Feito antes da semeadura

() Feito durante a semeadura.

- () Feito após sementeira
 () Feito após a colheita da cultura anterior

14 - Ocorreu excesso hídrico:

- () Sim () Não

Se sim:

Excesso 1 - Estágio de desenvolvimento: _____ Duração (em dias): _____

Excesso 2 - Estágio de desenvolvimento: _____ Duração (em dias): _____

Excesso 3 - Estágio de desenvolvimento: _____ Duração (em dias): _____

Outros: _____

15 - Ocorreu déficit hídrico:

- () Sim () Não

Se sim:

Deficit 1 - Estágio de desenvolvimento: _____ Duração (em dias): _____

Deficit 2 - Estágio de desenvolvimento: _____ Duração (em dias): _____

Deficit 3 - Estágio de desenvolvimento: _____ Duração (em dias): _____

Outros: _____

16 – Existe a possibilidade de irrigar a lavoura:

- () Sim () Não

17 – Realizou irrigação:

- () Sim () Não

SE IRRIGOU:

17.1 - Qual foi a forma de irrigação?

- () Banhos
 () Mangueiras plásticas
 () Aspersão
 () Outro: _____

17.2 - Numero de irrigações ao longo do ciclo: _____

Estágio fenológico no momento da(s) irrigação(ões): _____

17.3 – Critérios para irrigar:

- () sintomas de estresse hídrico na planta
 () umidade do solo
 () acompanhamento por assistência
 () Estágio de desenvolvimento
 () Outro: _____

18 – Características do Solo

Características do Solo	
Ano da última análise: _____	
Características	Valores
pH do Solo	
Fosfóro (P)	
Potássio (K)	
MO (%)	
Teores de:	%
Areia (%)	
Silte (%)	
Argila (%)	

19 – Adubação:

- A dose é determinada por:

- () Análise de solo
 () Dose padrão. Dose (toneladas): _____
 () Outro: _____

- **Adubação de base:**

Fórmula: _____ - _____ - _____

Quantidade: _____ kg/ha

- **Adubação de cobertura:**

Fórmula: _____ - _____ - _____

Quantidade: _____ kg/ha

Estágio de aplicação: _____

- Realiza Agricultura de Precisão/Aplicação a taxa variada?

() Sim () Não

20 - Faz tratamento de sementes com:

() Inseticida () Fungicida () Micronutriente () Outro, qual _____

21 - É realizada a inoculação da semente?

() SIM () NÃO

Em caso positivo, faz inoculação de quanto em quanto tempo:

() todos os anos () dois em dois anos () três em três anos () mais de três anos

21.1 - Qual a dose?

() Recomendada

() _____ x Recomendação (Exemplo: 1/2x , 2x , 3x...)

22 - Foi aplicado nitrogênio em cobertura para recuperar os efeitos de uma nodulação ineficiente?

() Não () Sim, quantidade e estágio de desenvolvimento: _____

23 – Tabela de Aplicação de Herbicidas, Inseticidas e Fungicidas:

Aplicação de Herbicidas			
Manejo de Inverno		Antes da sementeira	
Produto:		Produto:	
Dose: () Superior () Inferior () Recomendada		Dose: () Superior () Inferior () Recomendada	
Após a sementeira e antes da emergência		Após a emergência	
Produto:		Produto:	
Dose: () Superior () Inferior () Recomendada		Dose: () Superior () Inferior () Recomendada	
Quantos dias antes da sementeira foi realizada a dessecação da lavoura: _____			
Aplicação de Inseticida			
Aplicação	Produto	Motivo	Estagio Desenvolvimento
1º Aplicação:		() Lagartas () Percevejos () Outro	
2º Aplicação:		() Lagartas () Percevejos () Outro	
3º Aplicação:		() Lagartas () Percevejos () Outro	
4º Aplicação:		() Lagartas () Percevejos () Outro	
5º Aplicação:		() Lagartas () Percevejos () Outro	
6º Aplicação:		() Lagartas () Percevejos () Outro	

23.3 – Enumere abaixo as principais doenças que ocorreram na lavoura (se indicar mais do que uma, numere 1=Grande ocorrência; 2=Ocorreu; 3=Pouca ocorrência):

- Ferrugem
- Antracnose
- Rhizoctonia
- Phytophthora
- Fusarium
- Mildio
- Oídio
- Outro _____

20.4- Como a aplicação de fungicida é definida:

- Preventiva
- Calendarizada
- Pressão de doença
- Condição ambiental
- Outro: _____

28 – Data da colheita: ____ / ____ / ____

29 - Produtividade de grãos da lavoura: _____ (kg/ha ou Sacas/ha)