

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

Eduardo Lago Tagliapietra

**POTENCIAL E LACUNAS DE PRODUTIVIDADE DA CULTURA DA
SOJA PARA O ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL**

Santa Maria, RS
2020

Eduardo Lago Tagliapietra

**POTENCIAL E LACUNAS DE PRODUTIVIDADE DA CULTURA DA SOJA PARA O
ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL**

Dissertação 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 **Mestre em Engenharia Agrícola.**

Orientador: Prof. PhD. Nereu Augusto Streck

Santa Maria, RS
2020

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

Lago Tagliapietra, Eduardo

POTENCIAL E LACUNA DE PRODUTIVIDADE DA CULTURA DA
SOJA PARA O ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL / Eduardo Lago Tagliapietra.-
2020.

57 p.; 30 cm

Orientador: Nereu Augusto Streck

Coorientador: Alencar Junior Zanon

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de
Ciências Rurais, Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola, RS, 2020

1. Grupo de maturidade relativa 2. Modelos agrícolas 3. Regiões climáticas
4. Suprimento de água 5. *Glycine max* L I. Augusto Streck, Nereu II. Junior Zanon,
Alencar III. Título.

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

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

Eduardo Lago Tagliapietra

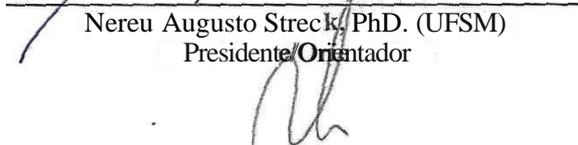
**POTENCIAL E LACUNAS DE PRODUTIVIDADE DA CULTURA DA SOJA
PARA O ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL**

Dissertação 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 **Mestre em Engenharia Agrícola**.

Aprovado em 05 de fevereiro de 2020:



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



Fabio Ricardo Marin, Dr. (ESALQ) - Videoconferência



Diego Nicolau Follmann, Dr. (UFSM)

Santa Maria,
RS 2020

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Lauro e Ivanete Tagliapietra, pela educação, incentivo, compressão e possibilitarem a realização dos meus sonhos.

Aos meus irmãos Bruna e Jonathan Lago Tagliapietra pela amizade e colaboração nessa jornada.

Aos meus avós paternos Alódia e Josué Tagliapietra por nunca medirem esforços para eu realizar esse sonho

Aos meus avós maternos Tereza e Waldemar Lago (in memoria) que mesmo distante sempre foram fonte da minha inspiração.

Aos meus tios Odacir e Jussara Tagliapietra por todo incentivo e colaboração.

A minha tia e segunda mãe, Jaqueline Maria Tagliapietra que ao longo desses sete anos de jornada acadêmica sempre esteve ao meu lado, ajudando, incentivando em todos os momentos.

A minha namorada, Marisa Gomes da Silva, que durante esses dois anos de mestrado foi minha fiel companheira em os momentos, além de me inspirar, ajudar e incentivar.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus por me guiar e proteger.

Aos meus pais Lauro e Ivanete Tagliapietra pela educação, apoio, carinho e compressão.

Aos meus irmãos Jonathan e Bruna Lago Tagliapietra pela amizade e incentivo em todos os momentos.

Aos meus avós pelo exemplo de vida, carinho e incentivo.

Aos meus tios, pelo apoio, ajuda e incentivo ao longo dessa jornada.

A minha namorada, Marisa Gomes da Silva, pelo incentivo, ajuda, carinho, compreensão e principalmente por estar sempre ao meu lado nessa jornada.

A Universidade Federal de Santa Maria e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola pela oportunidade de realização desse estudo.

Ao professor Nereu Augusto Streck, pela orientação e ensinamentos durante o mestrado.

Ao professor Alencar Junior Zanon, pelos ensinamentos, companheirismo e apoio para a execução desse trabalho.

Ao professor Rafael Battisti, pela ajuda com o modelo CSM-CROPGRO-Soybean.

Aos meus colegas e amigos, Gean Leonardo Richter, Alexandre Ferigolo Alves, Moises Freitas do Nascimento, Kelin Pribs Bexaira, Giovana Ribas, Michel Rocha da Silva, José Eduardo Minussi Winck, Thiago Schmitz Marques da Rocha, Patric Scolari Webber e Giovanni Antonello Barcellos pelo auxílio na elaboração da dissertação.

Ao meu colega e amigo Darlan Scapini Balest por ser meu “braço direito” ao longo do mestrado e principalmente na elaboração da dissertação.

Ao meu colega e amigo Solon Lemos da Rosa, por toda dedicação, ajuda e amizade ao longo da elaboração da dissertação.

Aos colegas e amigos do Grupo Soja pela condução dos experimentos e análises dos dados.

A Equipe FieldCrops, e aos colegas da sala 2, pela ajuda na condução dos experimentos e aplicação de questionários, e pela parceria e convívio ao longo dos anos.

A EMATER/ASCAR pela parceria na aplicação dos questionários em lavouras de produtores.

A CAPES pelo auxílio financeiro através de bolsa de mestrado.

A todas as pessoas que não foram mencionadas, mas que incentivaram a realização desse sonho.

MUITO OBRIGADO.

*“Eu não tenho ídolos.
Tenho admiração por trabalho,
dedicação e competência”
(Ayrton Senna)*

RESUMO

POTENCIAL E LACUNAS DE PRODUTIVIDADE DA CULTURA DA SOJA PARA O ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL

AUTOR: Eduardo Lago Tagliapietra
ORIENTADOR: Nereu Augusto Streck

O potencial de produtividade (PP) e o potencial de produtividade limitado por água (PPA) na cultura da soja foi estimado para diferentes regiões do Rio Grande do Sul. Essas informações podem ajudar a otimizar as práticas atuais de manejo da soja para aumentar a produtividade e a eficiência no uso de recursos. Os objetivos nesta dissertação foi (i) estimar o potencial e as lacunas de produtividade da cultura da soja para regiões climáticas no Rio Grande do Sul, (ii) identificar os fatores biofísicos e de manejo que potencialmente explicam a lacuna de produtividade existente e (iii) identificar os potenciais de produtividade nas diferentes épocas de semeaduras e grupo de maturidade relativa (GMR) e sua eficiência no uso da água. Foi usado o modelo CSM-CROPGRO-Soybean para estimar o potencial de produtividade e o potencial de produtividade limitado por água para as diferentes regiões do estado e um grande banco de dados que representou uma ampla gama de condições climáticas, tipos de solos, datas de semeaduras e grupo de maturidade relativa (GMR), composto por experimentos (2010 – 2019) e dados relatados por produtores (2016 – 2019) para identificar quais os fatores biofísicos e de manejo que potencialmente explicam as lacunas de produtividade existentes. Funções limites foram utilizadas para a estimativa dos potenciais de produtividades nas épocas de semeadura e GMRs e sua eficiência no uso da água. O PP variou de 6,1 a 7,2 Mg ha⁻¹ e 2,5 a 5,1 Mg ha⁻¹ para o PPA nas diferentes *buffer zones* (BZs), sendo o PPA médio do estado 6,6 Mg ha⁻¹ e o PPA médio 3,9 Mg ha⁻¹. A lacuna causada pela deficiência hídrica foi de 41% e a lacuna de manejo igual a 21%, sendo a época de semeadura o principal fator causador da lacuna de manejo. O potencial de produtividade variou de 6,2 a 5,2, do GMR mais precoce (GMR ≤ 5.5) ao mais tardio (GMR ≥ 7.0) e a eficiência do uso da água foi maior nos GMR ≤ 5.5 (9,6 Kg ha⁻¹ mm⁻¹) quando comparado com GMR ≥ 7.0 (8,5 Kg ha⁻¹ mm⁻¹).

Palavras-chave: *Glycine max* L. Grupo de maturidade relativa. Modelos agrícolas. Regiões climáticas. Suprimento de água.

ABSTRACT

YIELD POTENTIAL AND YIELD GAP IN SOYBEAN IN THE RIO GRANDE DO SUL STATE

AUTHOR: Eduardo Lago Tagliapietra

ADVISOR: Nereu Augusto Streck

The yield potential (YP) and water-limited yield potential (WYP) in soybean crop estimated for different regions of Rio Grande do Sul. This information may help to optimize management practices to increase yield and improve resource efficiency. The objectives of this dissertation was (i) to estimate yield potential and yield gaps to soybean for climatic regions in Rio Grande do Sul state, (ii) to identify biophysical and management factors that potentially explain the existing yield gap, and (iii) to identify the yield potentials at different sowing dates and soybean maturity group (MG) and their water use efficiency. The CSM-CROPGRO-Soybean model was used to estimate yield potential and water-limited yield potential for different regions of the Rio Grande do Sul state and a large database representing the variation of weather, soil types, sowing dates and maturity group (MG), represented by data from experiments (2010 - 2019) and data reported by farmers (2016 - 2019) to identify which biophysical and management factors explain the yield gaps. Boundary Function was used to estimate yield potential at sowing and MGs and their water use efficiency. The YP ranged from 6,1 to 7,2 Mg ha⁻¹ and WYP from 2,5 to 5,1 Mg ha⁻¹ in the different *buffer zones* (BZs), being the average YP 6.6 Mg ha⁻¹ and the WYP 3.9 Mg ha⁻¹. The yield gap caused by water deficiency was 41% and the yield gap by management was 21%, with sowing date being the main factor causing the yield gap by management. The yield potential ranged from 6.2 to 5.2, from earliest MG (MG ≤ 5.5) to later (MG ≥ 7.0) and water use efficiency was higher for MG ≤ 5.5 (9.6 kg ha⁻¹ mm⁻¹) when compared to MG ≥ 7.0 (8.5 kg ha⁻¹ mm⁻¹).

Keywords: *Glycine max* L. Maturity group. Crop models. Climate zones. Water use efficiency.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Mapas da divisão do Rio Grande do Sul em regiões climáticas. (A) divisão do estado em relação ao acúmulo de graus dias anual, (B) índice de aridez (precipitação/evapotranspiração), (C) sazonalidade de temperatura e (D) 14 regiões climáticas presentes no Rio Grande do Sul – Brasil, resultantes da sobreposição das variáveis climáticas apresentadas. 25
- Figura 2 - Mapa de área de colheita de soja do Rio Grande do Sul, de acordo com dados do IBGE, em relação a média das últimas 5 safras agrícolas (2014 – 2019)..... 26
- Figura 3 - Regiões climáticas com representatividade maior que 5% nas áreas cultivadas com soja no Rio Grande do Sul – Brasil, sendo as 6 regiões selecionadas representadas pelas letras de A a E. 26
- Figura 4 - Buffer zones (Regiões de abrangência da estação meteorológica) representativas da área produtiva de soja no Rio Grande do Sul, representadas pelos círculos na coloração bege e identificadas de I a XII. Polígonos representam as estações meteorológicas utilizadas para elaboração das buffer zones. 27
- Figura 5 - Mapa do Rio Grande do Sul com a localização das áreas experimentais (círculos vermelhos) e dos questionários aplicados em lavouras comerciais de produtores (círculo preto vazado). Experimentos conduzidos foram durante 9 anos agrícolas (2011 a 2019) e questionários durante 3 anos agrícolas (2016 a 2019) 30
- Figura 6 - Comparação entre as produtividades informada pelos produtores nos questionários e a produtividade estimada pelo IBGE para o Rio Grande do Sul em 3 anos agrícolas. Também são mostrados a linha 1:1 (linha preta contínua), variação de $\pm 0,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ (linha preta tracejada), regressão linear ajustada (linha sólida vermelha escuro), erro quadrático médio da raiz (RQME), RQME como porcentagem da produtividade média do banco de dados (% RQME) e erro médio absoluto (EMA) 32
- Figura 7 - (A) Potencial de produtividade de soja (PP), (B) Potencial de produtividade limitado por água de soja (PPA) e (C) Produtividade média de soja de 15 anos (2004-2019) nas diferentes buffer zones do Rio Grande do Sul..... 36
- Figura 8 - Variáveis meteorológicas médias, Temperatura máxima (°C), (B) Temperatura mínima (°C), (C) Temperatura média (°C), (D) radiação solar (MJ dia^{-1}), (E) coeficiente fototérmico ($\text{MJ dia}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) e (F) precipitação (mm) para o período de dezembro – março, com exceção do coeficiente fototérmico (R1 até R7), nas diferentes buffer zones do Rio Grande do Sul, durante o período 2004 – 2019. 37

- Figura 9 - (A) Lacuna de produtividade potencial de soja (%LPPP), (B) contribuição relativa da deficiência hídrica na perda de potencial de produtividade (%DHPPP) e (C) lacuna de produtividade devido ao manejo (LPM) nas diferentes buffer zones do Rio Grande do Sul. 38
- Figura 10 - Produtividade de soja no Rio Grande do Sul – Brasil. Coluna preta é o potencial de produtividade estimado pelo modelo (PP), coluna verde é o potencial de produtividade por experimentos (PPE), coluna azul é o potencial de produtividade pelos melhores produtores (PPP), coluna vermelha é o potencial limitado por água (PPA) estimado pelo modelo e a coluna cinza produtividade média (PM) do RS nos últimos 15 anos (2004 – 2019)..... 40
- Figura 11 - Árvore de regressão mostrando as 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. (A) altas produtividades (tercil superior) e (B) baixas produtividades (tercil inferior) 45
- Figura 12 - Produtividade de soja (Mg ha⁻¹) em relação a época de semeadura (dias após 20 de setembro) para diferentes faixas de GMR. (A) GMR ≤ 5.5, (B) GMR 5.6 a 6.0, (C) GMR 6.1 a 6.5, (D) GMR 6.6 a 6.9 e (E) GMR ≥ 7.0. Círculos azuis representam experimentos irrigados e círculos amarelos experimentos sem irrigação. Linha sólida preta representa a função limite. 47
- Figura 13 - Relação entre a data de início da perda do potencial de produtividade de soja e o grupo de maturidade relativa (GMR) (A) e a perda do potencial de produtividade em kg ha⁻¹ dia⁻¹ e o grupo de maturidade relativa (GMR) (B). 47
- Figura 14 - Produtividade de soja (Mg ha⁻¹) em relação ao suprimento de água (mm) durante a estação de cultivo (SEM – R7) para diferentes faixas de GMR. O suprimento de água foi estimado como a soma da água disponível no solo na semeadura, precipitação e irrigação total. (A) GMR ≤ 5.5, (B) GMR 5.6 a 6.0, (C) GMR 6.1 a 6.5, (D) GMR 6.6 a 6.9 e (E) GMR ≥ 7.0. Círculos azul representa experimentos irrigados e Círculos amarelos experimentos sem irrigação. Linha sólida preta representa a função limite, linha sólida vermelha representa a estabilização da função limite, na qual o acréscimo na produtividade é inferior 0.05% e linha tracejada vermelha representa a inclinação da função limite. 49

Figura 15 - Disponibilidade de água (WS) ao longo do ciclo (SEM – R7) em relação ao grupo de maturidade relativa (GMR) (A) e disponibilidade de água mínima ao longo do ciclo (SEM – R7) em relação ao grupo de maturidade relativa (GMR) (B). 50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização das variáveis utilizadas para simulação do potencial de produtividade e potencial de produtividade limitado por água para as buffer zones no Rio Grande do Sul – Brasil	28
Tabela 2 - Caracterização dos experimentos conduzidos durante 9 anos (2010-2019) agrícolas no Rio Grande do Sul – Brasil.....	29
Tabela 3 - Dados coletados em lavouras de produtores de soja no Rio Grande do Sul durante três anos agrícolas (2016 – 2019).....	31
Tabela 4 - Variáveis que explicam as lacunas de produtividades no Rio Grande do Sul. AP representam o grupo das altas produtividades (33% das maiores produtividades), BP representam o grupo das baixas produtividades (33% das menores produtividades) e n representa o número de questionários analisados.....	43

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	14
1.1	OBJETIVOS	15
1.1.1	Objetivo geral	15
1.1.2	Objetivos específicos	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1	IMPORTÂNCIA DA CULTURA DA SOJA.....	16
2.2	GRUPO DE MATURIDADE RELATIVA E ÉPOCA DE SEMEADURA	18
2.3	POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE E POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE LIMITADA POR ÁGUA	19
2.4	MODELOS DE SIMULAÇÃO DO CRESCIMENTO, DESENVOLVIMENTO E PRODUTIVIDADE DA SOJA	21
2.5	ESTUDOS DE LACUNAS DE PRODUTIVIDADES NO BRASIL	23
3	MATERIAL E MÉTODOS	24
3.1	CARACTERIZAÇÃO E DIVISÃO ZONAS CLIMÁTICAS.....	24
3.2	SIMULAÇÃO DO POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE E POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE LIMITADO POR ÁGUA E ESTIMATIVA DAS LACUNAS DE PRODUTIVIDADE	28
3.3	IDENTIFICAÇÃO DE FATORES QUE CAUSAM AS LACUNAS DE PRODUTIVIDADE.....	30
3.4	FUNÇÃO LIMITE PARA DATA DE SEMEADURA E DISPONIBILIDADE DE ÁGUA EM RELAÇÃO AO POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE POR FAIXA DE GRUPO DE MATURIDADE RELATIVA	33
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
4.1	POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE, POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE LIMITADO POR ÁGUA E LACUNAS DE PRODUTIVIDADES NAS <i>BUFFER ZONES</i>	34
4.2	POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE E LACUNAS DE PRODUTIVIDADE NA SOJA NO RIO GRANDE DO SUL	39
4.3	FATORES CAUSADORES DAS LACUNAS DE PRODUTIVIDADE EM LAVOURAS DE SOJA NO RIO GRANDE DO SUL	41
4.4	POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE DE ACORDO COM A ÉPOCA DE SEMEADURA E A DEMANDA DE ÁGUA PARA OS DIFERENTES GRUPOS DE MATURIDADE RELATIVA	45
5	CONCLUSÃO	51
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

O Brasil é o segundo maior produtor mundial de soja, responsável por 32% da produção global (FAOSTAT, 2019). Cerca de 17% da soja brasileira é produzida no Rio Grande do Sul (RS), 3º estado maior produtor de soja do Brasil e do mundo (CONAB, 2019; FAOSTAT, 2019). O melhoramento genético e o aperfeiçoamento de práticas de manejos utilizadas pelos produtores aumentaram a produtividade média do estado em 20% durante os últimos 10 anos (2010 - 2014 em relação 2015 - 2019). Mesmo assim, a produtividade média se encontra próxima a 3 Mg ha⁻¹, valor bastante inferior a produtividades obtidas em experimentos (+- 6 Mg ha⁻¹) (TAGLIAPIETRA et al., 2018; ZANON et al., 2016), demonstrando a existência de uma lacuna de produtividade a ser estudada. Além disso, o RS apresenta características específicas em relação a outras regiões produtoras de soja do mundo, como a grande variabilidade climática, de solos e a localização em ambiente subtropical (latitude -27°S a -33°S), onde encontram-se os maiores potenciais de produtividade do mundo (BOURNE, 2014; CASSMAN, 2009). Essas características geram uma ampla variabilidade de potenciais e lacunas de produtividade a serem exploradas, em uma área agrícola (ambiente subtropical) impacta em mais de 50% da produção mundial de soja (TAGLIAPIETRA et al., 2018).

Por definição o potencial de produtividade (PP) é a produtividade de uma cultivar que cresce sem limitações de água e nutrientes, livre de estresses bióticos (doenças, pragas e plantas daninha), ou seja, a taxa de crescimento da planta ou da cultura é determinada pela radiação solar interceptada pelo dossel, temperatura, CO₂ atmosférico e características genéticas (EVANS, 1993; VAN ITTERSUM; RABBINGE, 1997). O potencial de produtividade limitado por água (PPA) é semelhante ao PP, com a diferença que, além dos fatores que determinam o PP, o PPA é influenciado pela quantidade e distribuição de água e pelas características do solo e do terreno que impactam na capacidade de armazenamento de água no solo para a cultura (FAO; DWFI, 2015; VAN ITTERSUM et al., 2013). Conhecer o PP e o PPA para as diferentes regiões climáticas e características de solos possibilitam aos produtores o planejamento mais eficiente de suas lavouras, com base nos estudos o investimento de recursos pode ser ajustado para atingir produtividades próximas de 80% sobre o PP (para áreas irrigadas) ou sobre o PPA (para áreas de sequeiro), maximizando a eficiência do uso de recursos e o lucro do produtor, aumentando a sustentabilidade do sistema produtivo (VAN ITTERSUM; RABBINGE, 1997). Os estudos de potencial de produtividade e lacunas de produtividade tem sido a identificação dos principais fatores biofísicos e de manejo que limitam o aumento de produtividade e o direcionamento de novas linhas de pesquisa para aprimorar as atuais práticas

de manejo (VAN ITTERSUM et al., 2013). O resultado desses estudos vêm sendo frequentemente utilizados para decisões de políticas agrícolas (DENG et al., 2019), 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., 2015b). No Brasil estudos sobre o potencial de produtividade foram realizados por Sentelhas et al. (2015), Battisti et al. (2017), Battisti et al. (2018), porém esses estudos não consideraram as regiões climáticas e as características de solos, como foi considerado pelos estudos realizados por Edreira et al., (2017) para o Estados Unidos e por Merlos et al., (2015) para a Argentina, e que torna possível a extrapolação e comparação dos resultados para outras regiões com características climáticas e de solos semelhantes ao redor do mundo.

Para preencher essa informação sobre o potencial e as lacunas de produtividade em regiões climáticas, modelos matemáticos mecanísticos para a simulação do potencial produtivo de soja foram calibrados utilizando dados de clima, de solos e de manejo com alta qualidade, seguindo os protocolos do projeto Global Yield Gap Atlas ((GRASSINI et al., 2015b; VAN BUSSEL et al., 2015), <http://www.yieldgap.org/methods>), e que são utilizados em estudos em outras regiões do mundo (EDREIRA et al., 2017; GUILPART et al., 2017; GRASSINI et al., 2015b; MERLOS et al., 2015). Para representar a ampla variação de grupo de maturação (GMR) e a ampla janela de semeadura presente na região de estudo, um grande conjunto de dados de experimentos (2011-2019) realizado em estações de pesquisa e em lavouras comerciais no RS e um conjunto de dados reportados de produtores (2016-2019), que retratam uma ampla gama de condições climáticas e de práticas de manejo.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Estimar o potencial e as lacunas de produtividade da cultura da soja em regiões climáticas do Rio Grande do Sul.

1.1.2 Objetivos específicos

Quantificar o potencial e a lacuna de produtividade da cultura da soja no Rio Grande do Sul

Identificar os fatores biofísicos e de manejo que potencialmente explicam a lacuna de produtividade nas lavouras de soja do Rio Grande do Sul.

Identificar os potenciais de produtividade em diferentes épocas de semeaduras e grupo de maturidade relativa e sua eficiência no uso da água.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 IMPORTÂNCIA DA CULTURA DA SOJA

Estima-se que em 2050, a população mundial ultrapassará a marca de 9 bilhões de pessoas (FAOSTAT, 2019), e com esse cenário faz-se necessário aumentar a produção de alimentos, tanto em quantidade quanto em qualidade, a fim de suprir a demanda futura de alimentos e garantir a segurança alimentar. A expansão das fronteiras agrícolas é uma alternativa para o aumento da produção de alimentos, entretanto, a adoção dessa medida gera grande impacto ambiental. Outra alternativa para fortalecer a segurança alimentar nacional através do aumento da produção de grãos, se dá pela redução da lacuna de produtividade (Yield Gap), onde busca-se a intensificação sustentável da área agricultável atual, aumentar a produtividade, eficiência do uso de recursos e redução do impacto ambiental. Entre as iniciativas em escala global, que tem como objetivo aumentar a produção de alimentos de forma vertical, sustentável e com o mínimo de impacto ambiental se destaca o projeto Global Yield Gap Atlas (GYGA) (www.yieldgap.org), um esforço internacional para identificar e diminuir a lacuna de produtividade das principais culturas agrícolas ao redor do Planeta.

O Brasil, como um dos maiores produtores mundiais de alimentos, tem a obrigação de qualificar pessoas e desenvolver ciência e tecnologia para participar da solução e das oportunidades mundiais no tema da segurança alimentar. Caso contrário, poderá aumentar sua dependência tecnológica e ser um mero comprador dos pacotes tecnológicos desenvolvidos por multinacionais em outros países. O ambiente subtropical brasileiro é diferente da maior parte do ambiente subtropical do globo (Austrália, Chile, deserto do Saara, Arábia Saudita e parte do México), pois não apresenta ambiente árido e/ou desértico, ao contrário, apresenta um regime pluviométrico isoigro (chuvas bem distribuídas ao longo do ano) com totais anuais de chuva entre 1000 e 2000 mm/ano. Além disso, estudos anteriores (MULLER et al., 2013) sugerem que o ambiente subtropical brasileiro poderia se tornar um futuro celeiro mundial na produção de grãos.

A cultura da soja (*Glycine max* L.) ocupa uma posição de destaque na agricultura

mundial com uma produção de 361 milhões de toneladas em 126 milhões de hectares (FAOSTAT, 2019). Brasil, Argentina e Paraguai, estão localizados na região subtropical da América do Sul e juntos representam 50% da produção mundial de soja, com 57 milhões de hectares cultivados, sendo a maior área de cultivo de soja no mundo (FAOSTAT, 2019). O Brasil possui importância significativa na oferta e na demanda da soja, sendo o segundo maior produtor e o maior exportador mundial, com uma produção de 114,80 milhões de toneladas, em 35,80 milhões de hectares e produtividade média de 3,20 Mg ha⁻¹ (CONAB, 2019). Na safra 2018/2019 a produção de soja na Região Sul (Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul) foi de 37,80 milhões de toneladas em uma área de 11,90 milhões de hectares, ficando atrás somente da Região Centro-Oeste e, deste total, o Rio Grande do Sul (RS) foi responsável pela produção de 19,20 milhões de toneladas de soja em 5,80 milhões de hectares e produtividade média de 3,30 Mg ha⁻¹ (CONAB, 2019).

A soja é tradicionalmente cultivada em terras altas, onde os solos possuem boa drenagem natural, isto é, são solos não hidromórficos (MIYASAKA; MEDINA, 1981). Entretanto, principalmente na metade Sul do RS, a utilização da soja como alternativa no controle de plantas daninhas no cultivo de arroz irrigado, têm impulsionado a sua expansão para áreas de terras baixas, atingindo aproximadamente 300 mil hectares na safra 2017/2018 no RS (IRGA, 2019). Áreas de terras baixas são predominantemente planossolos, gleissolos e associação entre eles (THOMAS; LANGE, 2014), caracterizados como solos hidromórficos com baixa drenagem natural, perfil do solo com superfície rasa e camada subsuperficial quase impermeável (STRECK et al., 2008).

Principal oleaginosa cultivada, a soja representa 56% da produção total de sementes oleaginosas no mundo (FAOSTAT, 2019). Possui elevado teor de proteína em seus grãos (cerca de 40%), portanto, constitui uma importante fonte para a alimentação humana e animal e, é considerada uma cultura chave na segurança alimentar global (CAFARO LA MENZA et al., 2017). De acordo com a FAO (2019), a população mundial vem crescendo significativamente, aumentando a demanda e, conseqüentemente, a competitividade no mercado de alimentos. Para atender essa demanda, o produtor rural deve aumentar a eficiência no seu sistema produtivo, através do aumento de produtividade (MARCON et al., 2017). Estudos sobre a cultura da soja são motivados pela crescente demanda mundial de alimentos e de energia para atender ao aumento populacional e de renda em muitos países, já que isso afeta diretamente na dieta alimentar da população, que tende a buscar alimentos ricos em proteína (FERMONT et al., 2009; GRASSINI et al., 2015).

2.2 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.

Mourtzinis et al. (2017) estimaram que uma mesma cultivar semeada em diferentes épocas pode apresentar uma diferença de $1,2 \text{ Mg ha}^{-1}$ de produtividade para um mesmo ambiente. De acordo com Blount et al. (2015), uma seleção de o GMR mais adaptado para uma área alvo, associado a datas de semeadura mais adequados, ajuda a reduzir as perdas de produtividade em relação às pragas e doenças, desde os estágios críticos do ciclo de vida da planta ocorre sob condições ambientais mais favoráveis.

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.

2.3 POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE E POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE LIMITADA POR ÁGUA

O potencial de produtividade (PP) (também referido como produtividade potencial por muitos autores) é a produtividade de uma cultivar que cresce sem limitações de nutrientes, sem estresses bióticos (plantas daninhas, insetos e doenças) e sem deficiência de água, ou seja, a taxa de crescimento da planta ou da cultura é determinada pela radiação solar interceptada pelo dossel, temperatura, CO_2 atmosférico e características genéticas (EVANS, 1993; VAN ITTERSUM; RABBINGE, 1997).

Potencial de produtividade é restrito ao local de estudo por causa do clima, mas em

teoria as propriedades químicas e físicas do solo não são limitantes, assumindo que a disponibilidade necessária de água e nutrientes podem ser manejadas, o que não é prático ou economicamente viável em casos onde o solo apresenta restrições, como barreiras físicas para o aprofundamento radicular. Portanto em áreas onde o solo não apresenta restrições para a cultura a produtividade potencial pode ser utilizada como referência (VAN ITTERSUM et al., 2013).

O potencial de produtividade pode ser determinado pela utilização de 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. Outra maneira de determinar o PP é por dados de experimentos de campo e lavouras, sendo levado em consideração para esta estimativa o tercil superior das produtividades (GRASSINI et al., 2015. LOBBEL et al., 2009; VAN ITTERSUM et al., 2013;).

O potencial de produtividade limitada por água (PPA) é semelhante ao potencial de produtividade, a diferença é que a produtividade também é influenciada pela água, a quantidade de abastecimento e distribuição e as características do solo (capacidade de retenção de água e profundidade de enraizamento) e do terreno que a disponibilidade hídrica da cultura influencia, como a textura do solo, profundidade do solo e inclinação campo (FAO & DWFI, 2015; VAN ITTERSUM et al., 2013).

A metodologia para determinar o PP e o PPA é baseada nas épocas de semeadura ideais, 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).

O PP e o PPA são definidos por espécies de culturas, cultivares, clima, tipo de solo (PPA) e abastecimento de água (PPA), e, portanto, PP e PPA são altamente variáveis entre e dentro das regiões. No entanto, é impossível para os agricultores alcançar a perfeição no manejo de culturas e solo necessário para atingir PP ou PPA, e geralmente não é de interesse do produtor fazer isso porque torna-se economicamente inviável, uma vez que o gasto com insumos é maior que o retorno produtivo (KONING et al., 2008; LOBELL et al., 2009).

A produtividade média é definida como a produtividade efetivamente alcançada numa determinada região, reflete o estado atual de solos e clima, utilização de tecnologia e habilidades médias dos produtores. A produtividade é a média de determinada região com certa

homogeneidade nas práticas de manejo (época de semeadura, grupo de maturidade, densidade de planta, adubação e manejo fitossanitário). Para a produtividade média ser representativa de determinado local o número de anos utilizados para sua estimativa deve compreender a variabilidade anual produtividade (VAN ITTERSUM et al., 2013).

Como as produtividades agrícolas tendem a estabilizar quando atingem 75-85% de PP ou PPA, a lacuna de produtividade a ser explorada é menor (CASSMAN, 1999; CASSMAN et al., 2003; VAN ITTERSUM; RABBINGE, 1997). Em conjunto, o potencial de produtividade, a produtividade limitada por água e a produtividade média determinam as lacunas de produtividades agrícola dos sistemas de cultivo atuais com recursos terrestres e hídricos disponíveis.

2.4 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, 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 (Decision Support System for Agrotechnology Transfer, (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.

2.5 ESTUDOS DE LACUNAS DE PRODUTIVIDADES NO BRASIL

Estudos relacionados às lacunas de produtividade ainda são incipientes em países em desenvolvimento, apesar de a lacuna ser, teoricamente, muito maior que nos países desenvolvidos, isso decorrente de sua localização em ambientes de clima subtropical e tropical aonde apresentam maiores incidências de doenças e pragas, uma vez que não possuem inverno rigoroso, o qual diminui perdas de produtividades relacionadas aos fatores fitossanitários, outro fator desfavorável para esses ambientes é a maior degradação de matéria orgânica, como consequência diminuindo a fertilidade natural dos solos. Trata-se de um grande desafio, pois este aumento na produção de alimentos deve ser acompanhado da redução da degradação ambiental. Entende-se como lacuna de produtividade a diferença entre a produtividade média atualmente obtida pelos agricultores e o potencial de produtividade disponível pelo ambiente, podendo ou não ser limitado por água (de acordo com o uso de irrigação). Através desse modelo de estudo, é possível identificar regiões do mundo onde há potencial para o aumento da produtividade, além de avaliar os padrões de segurança alimentar no futuro.

No Brasil, os estudos sobre lacunas de produtividade ainda são incipientes, tendo sido realizados para as culturas da cana-de-açúcar e milho (GLOBAL YIELD GAP ATLAS, 2016; MONTEIRO; SENTELHAS, 2014) e soja (BATTISTI et al., 2017, 2018; SENTELHAS et al., 2015). No trabalho de lacuna de produtividade em soja realizado por SENTELHAS et al. (2015), a densidade de locais amostrados no Brasil é baixa (apenas 17 locais em todo território nacional e apenas um local no Rio Grande do Sul), o PP foi calculado por um modelo agrometeorológico simples da FAO e para uma faixa de grupo de maturação entre 6 e 7, e os dados observados de produtividade média foram da base de dados do IBGE. Battisti et al. (2017) tinha como objetivo no seu estudo, avaliar características adaptativas da soja aos déficits hídricos que possam melhorar a produtividade em climas atuais e futuros, fornecendo diretrizes para o melhoramento do cultivar de soja no sul do Brasil. Battisti et al. (2018) quantificou a diferença de produtividade da soja causada pelo déficit hídrico e gestão da cultura, porém utilizou dados das áreas de competição de produção de soja no Brasil (CESB), os quais não representam a realidade das lavouras brasileiras.

Os modelos de simulação das culturas para calcular PP recomendados para serem usados em estudos de lacunas de produtividade devem funcionar no passo de tempo de um dia,

levar em consideração os processos de crescimento e desenvolvimento fundamentais (process-based models) forçados por variáveis meteorológicas diárias, condições de solo e atributos ecofisiológicos, ter flexibilidade para simular práticas de manejo (data de semeadura, densidade de plantas e grupo de maturação de cultivares específicas) e mínimo número de coeficientes genéticos (VAN ITTERSUM et al., 2013). Quanto aos dados observados de produtividade médio, os dados de órgãos governamentais são muitas vezes a única fonte, mas podem não representar a maioria das lavouras do município, devido à complexidade da realidade de cada lavoura. Por isso, GRASSINI et al. (2014) recomendam que os dados de PM para cálculo da LP sejam determinados diretamente em lavouras utilizando-se questionários padronizados para levantar informações técnicas e de manejo empregados em cada lavoura.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 CARACTERIZAÇÃO E DIVISÃO ZONAS CLIMÁTICAS

A área analisada neste estudo corresponde às regiões produtoras de soja em terras altas no Rio Grande do Sul. 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, o Estado foi dividido em 14 zonas climáticas (ZC) homogêneas (Figura 1D).

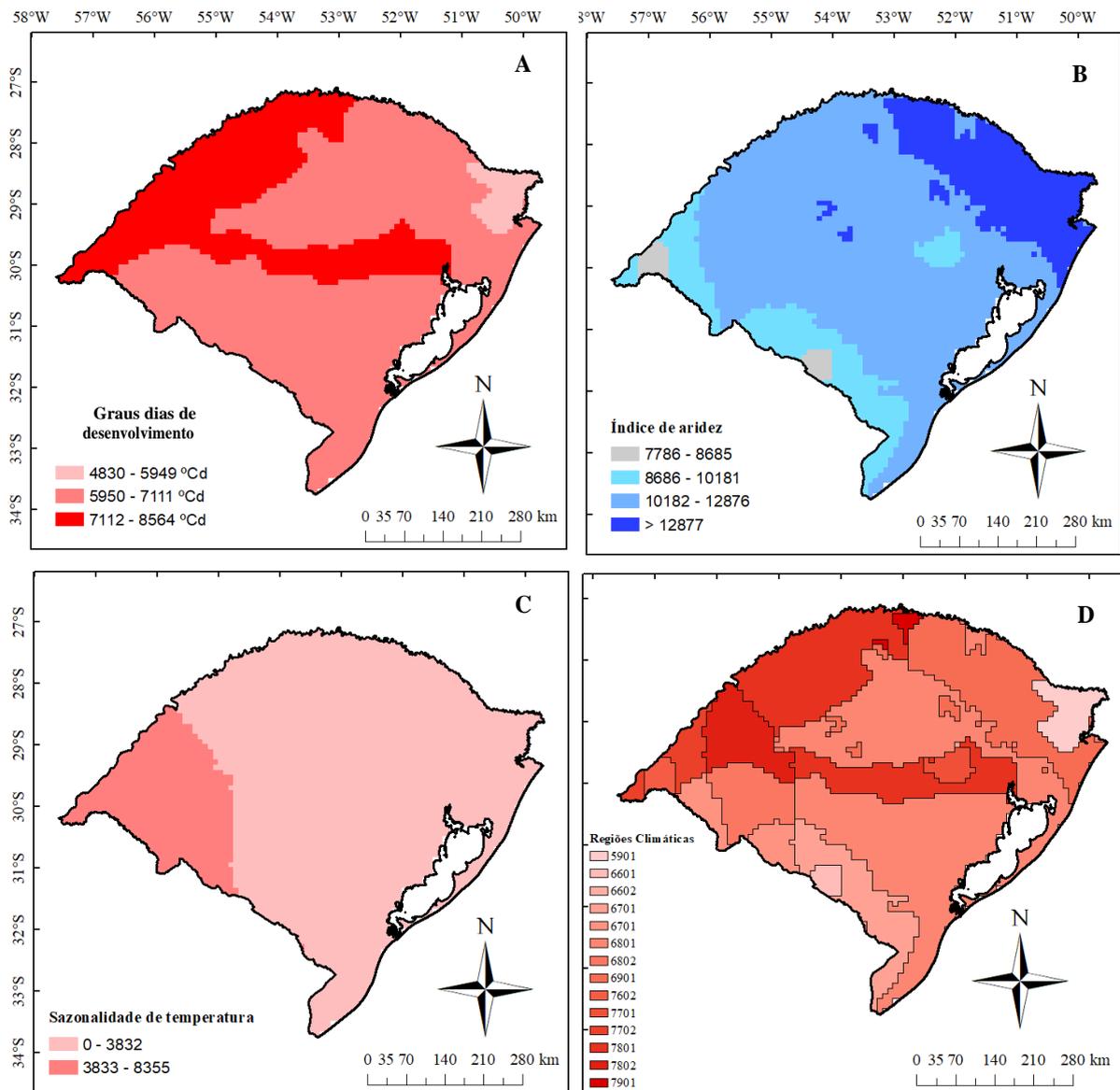


Figura 1: Mapas da divisão do Rio Grande do Sul em regiões climáticas. (A) divisão do estado em relação ao acúmulo de graus dias anual, (B) índice de aridez (precipitação/evapotranspiração), (C) sazonalidade de temperatura e (D) 14 regiões climáticas presentes no Rio Grande do Sul – Brasil, resultantes da sobreposição das variáveis climáticas apresentadas.

Um mapa de colheita foi elaborado com base nos dados de área colhida do IBGE média de 5 anos (2014-2019) 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, conforme metodologia GYGA, assim totalizando 6 ZC selecionadas, representando 90% da área produtiva com a cultura da soja (Figura 3).

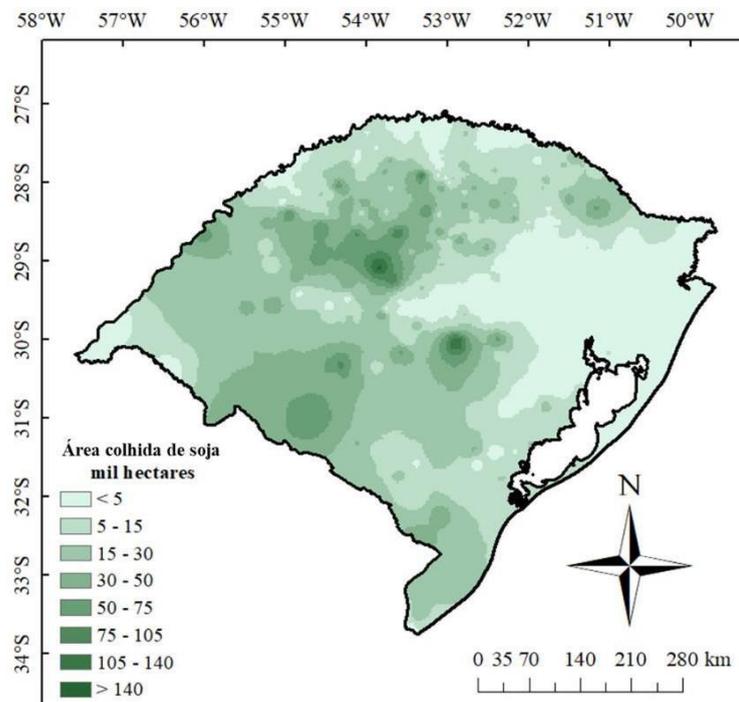


Figura 2: Mapa de área de colheita de soja do Rio Grande do Sul, de acordo com dados do IBGE, em relação a média das últimas 5 safras agrícolas (2014 – 2019).

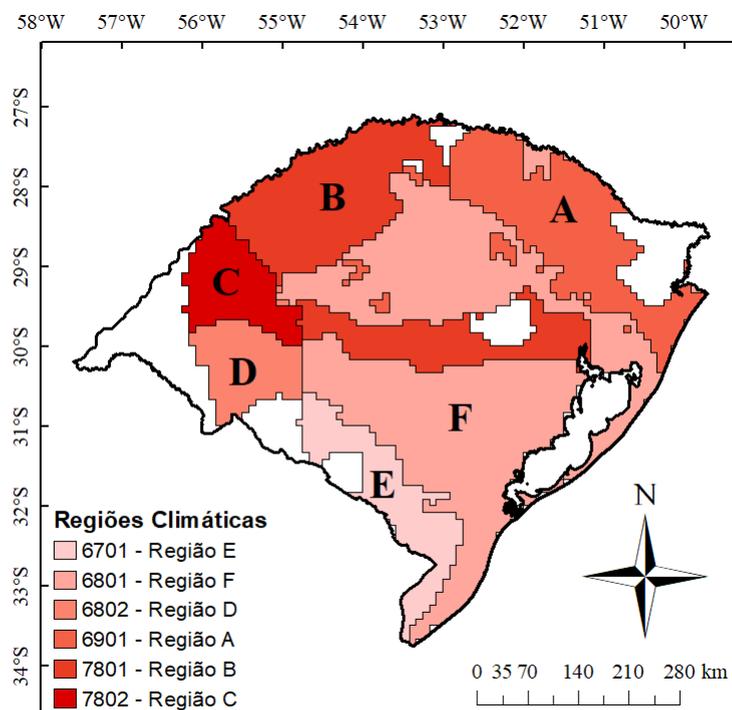


Figura 3: Regiões climáticas com representatividade maior que 5% nas áreas cultivadas com soja no Rio Grande do Sul – Brasil, sendo as 6 regiões selecionadas representadas pelas letras de A a E.

Segundo Grassini et al. (2015a), para uma estimativa robusta e confiável são necessários 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 *buffer zones* (Regiões de abrangência da estação - *BZs*) numa área de 100 km de diâmetro, sendo elas delimitados pelos limites das ZC (Figura 4). Foram selecionadas as *buffer zones* (*BZs*) com mais de 5% da área de colheita, evitando mais de 20% de sobreposição entre elas. Dessa forma, 12 *BZs* (I a XII) foram selecionadas, totalizando 67% da área produtora de soja.

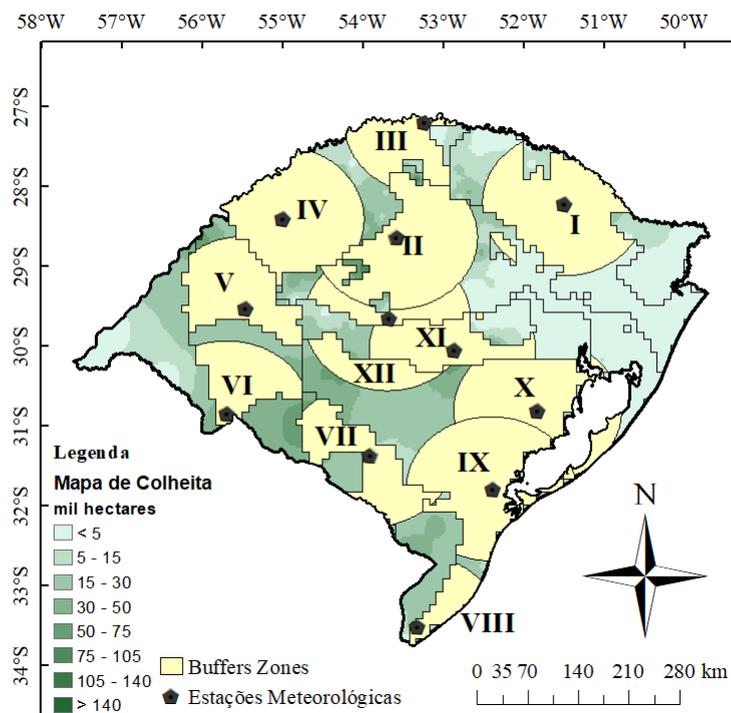


Figura 4: *Buffer zones* (Regiões de abrangência da estação meteorológica) representativas da área produtiva de soja no Rio Grande do Sul, representadas pelos círculos na coloração bege e identificadas de I a XII. Polígonos representam as estações meteorológicas utilizadas para elaboração das *buffer zones*.

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>).

3.2 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 máximas produtividades de produtores.

Para a estimativa do PP e o PPA por modelos, foi utilizado o CSM-CROPGRO-Soybean e realizadas simulações utilizando os grupos de maturidade relativa (GMR) mais utilizados pelos produtores para cada *BZs* (tabela 1) (EMATER, 2019) e a data de semeadura a qual melhor representa cada região (tabela 1). As simulações foram realizadas para 15 anos (2004 – 2019), segundo Grassini et al. (2015a) valores para uma estimativa precisa e segura. 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 para as *buffer zones* no Rio Grande do Sul – Brasil.

Buffers Zones	Local	Região Climática (ZC)	Data de Semeadura	GMR	Tipo de Solo	Profundidade (cm)
I	Lagoa Vermelha	ZC 6701 - Região A	01 de novembro	6.0	Neossolos Nitossolos	50 100
II	Cruz Alta	ZC 6801 - Região F	20 de outubro	6.0	Latossolo Vermelho Argissolo vermelho	100 100
III	Irai	ZC 7801 - Região B	20 de outubro	6.0	Latossolo Vermelho Cambissolos	100 100
IV	São Luiz Gonzaga	ZC 7801 - Região B	20 de outubro	6.0	Latossolo Vermelho	100
V	Alegrete	ZC 7802 - Região C	10 de novembro	6.5	Latossolo Vermelho Neossolos	100 50
VI	Santana do Livramento	ZC 6802 - Região D	10 de novembro	6.5	Neossolos Argissolo vermelho	50 100
VII	Bagé	ZC 6701 - Região E	10 de novembro	6.5	Planossolo	50
VIII	Santa Vitória do Palmar	ZC 6801 - Região F	10 de novembro	6.5	Argissolo vermelho	100
IX	Pelotas	ZC 6801 - Região F	10 de novembro	6.5	Planossolo	50
X	Camaquã	ZC 6801 - Região F	10 de novembro	6.5	Argissolo vermelho-amarelo Planossolo	100 50
XI	Cachoeira do Sul	ZC 7801 - Região B	10 de novembro	6.5	Argissolo vermelho Planossolo	100 50
XII	Santa Maria	ZC 6801 - Região F	10 de novembro	6.5	Argissolo vermelho Neossolos	100 50

O potencial de produtividade por experimentos (PP_E) foi estimado a partir da condução de experimentos em nível tecnológico potencial em 24 locais do Rio Grande do Sul durante 9 anos agrícolas (Tabela 2 e Figura 5). Mais informações sobre os experimentos podem ser encontrados em Richter et al. (2014); Tagliapietra et al. (2018); Zanon et al. (2016). A faixa de

semeadura utilizada para estimativa do potencial foi de 20 de setembro até 31 de novembro, totalizando 502 combinações GMR x ambiente, sendo o PP_E definido como a média dos 5% do percentil superior, conforme utilizado por Edreira et al. (2017); Lobell et al. (2009).

Tabela 2: Caracterização dos experimentos conduzidos durante 9 anos (2010-2019) agrícolas no Rio Grande do Sul – Brasil.

Local	Ano Agrícola	Intervalo de semeadura	Cultivares	Faixa GMR	Regime hídrico	Tipo de Solo
Santa Maria	11/12 a 18/19	05 Ago - 22 -Mar	21	3.9 a 8.3	Irrigado e Não Irrigado	Argisolo Vermelho
Santa Vitória do Palmar	14/15 - 15/16	30 Set - 16 Dez	5	4.8 a 8.2	Irrigado e Não Irrigado	Planosolo Háplico
Cachoeirinha	14/15 a 16-18	04 Out - 18 Dez	14	4.8 a 8.2	Irrigado e Não Irrigado	Planosolo Háplico
Bagé	14/15	11.nov	3	4.8 a 8.2	Não Irrigado	Planosolo Háplico
Cachoeira do Sul	14/15 - 17/18	09 Out - 05 Jan	10	4.8 a 8.2	Irrigado e Não Irrigado	Planosolo Háplico
Água Santa	13/14 - 14/15	08 Nov - 03 Dez	14	4.8 a 8.2	Não Irrigado	Latosolo Vermelho
Capão do Cipó	18/19	15.out	2	6.4 a 6.5	Não Irrigado	Latosolo Vermelho
Cruz Alta	17/18 - 18/19	03 Nov - 20 Nov	2	5.8 a 6.5	Irrigado e Não Irrigado	Latosolo Vermelho
Frederico Westphalen	13/14	23.nov	13	4.8 a 8.2	Não Irrigado	Latosolo Vermelho
Ibirubá	17/18 - 18	07 Nov - 01 Fev	5	5.0 a 7.8	Irrigado e Não Irrigado	Latosolo Vermelho
Itaqui	13/14 - 19	13 Out - 23 Fev	27	4.8 a 8.2	Irrigado e Não Irrigado	Planosolo Háplico
Julio de Castilhos	14/15 - 17/18-18/19	20 Out - 18 Nov	15	4.8 a 8.2	Irrigado e Não Irrigado	Argisolo Vermelho
Manoel Viana	18/19	06.nov	2	6.4 a 6.5	Não Irrigado	Argisolo Vermelho
Não Me Toque	18/19	23.out	1	5.7	Não Irrigado	Latosolo Vermelho
Palmares do Sul	14/15	28.nov	2	4.8 a 6.3	Não Irrigado	Planosolo Háplico
Panambi	18/19	15.out	1	5.7	Não Irrigado	Latosolo Vermelho
Pelotas	12/13 - 15-16	23 Out - 15 Dez	14	4.8 a 8.2	Não Irrigado	Planosolo Háplico
Restinga Sêca	13/14 - 14/15	13 Nov - 14 Nov	6	4.8 a 8.2	Não Irrigado	Argisolo Vermelho
Santo Ângelo	17/18 - 18/19	17 Out - 16 Fev	7	4.8 a 7.8	Não Irrigado	Latosolo Vermelho
Santo Augusto	13/14	18.nov	13	4.8 a 8.2	Não Irrigado	Latosolo Vermelho
São Francisco de Assis	17/18	05 Dez - 11 Nov	2	6.2 a 6.3	Não Irrigado	Planosolo Háplico
São Luiz Gonzaga	18/19	14.out	2	6.4 a 6.5	Não Irrigado	Latosolo Vermelho
Tupanciretã	13/14 - 14/15 - 18/19	22 Out - 23 Dez	15	4.8 a 8.2	Não Irrigado	Argisolo Vermelho
Uruguaiana	14/15 - 15/16 -18/19	16 Out - 23 Dez	26	4.8 a 6.7	Irrigado e Não Irrigado	Chernosolo Ebânico

Para estimativa do PP pelas máximas produtividades dos produtores (PP_P) foi utilizado dados obtidos em três anos agrícolas (2016/2017, 2017/2018 e 2018/2019) através da aplicação de questionários junto aos produtores agrícolas (Figura 5). A faixa de semeadura utilizada seguiu a mesma do PP_E , apresentando 322 combinações genótipos x ambiente, sendo o PP_P definido como a média dos 5% do percentil superior. A estimativa das lacunas de produtividade foi determinada pela diferença entre os potenciais de produtividade (PP , PP_A , PP_E e PP_P) e a produtividade média (PM).

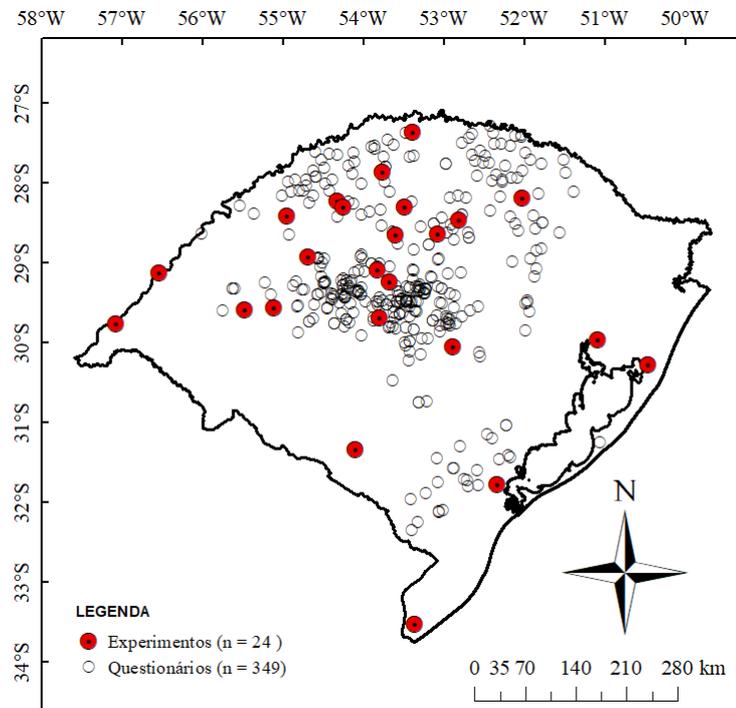


Figura 5: Mapa do Rio Grande do Sul com a localização das áreas experimentais (círculos vermelhos) e dos questionários aplicados em lavouras comerciais de produtores (círculo preto vazado). Experimentos conduzidos durante 9 anos agrícolas (2011 a 2019) e questionários durante 3 anos agrícolas (2016 a 2019).

3.3 IDENTIFICAÇÃO DE FATORES QUE CAUSAM AS LACUNAS DE PRODUTIVIDADE

Durante 3 anos agrícolas (2016/2017, 2017/2018 e 2018/2019) foram acompanhadas 349 lavouras comerciais em diferentes regiões do Rio Grande do Sul, englobando as distintas características edafoclimáticas das regiões produtoras de soja (Figura 5). Nessas lavouras comerciais 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 3).

Tabela 3: Dados coletados em lavouras de produtores de soja no Rio Grande do Sul durante três anos agrícolas (2016 – 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
	Densidade	Sementes por ha
	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		
	Herbicida	Sim / não (quantas aplicação)
	Fungicida	Sim / não (quantas aplicação)
	Inseticida	Sim / não (quantas aplicação)
Outros fatores redutores de produtividade	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 IBGE (<https://sidra.ibge.gov.br/home/pimpfbr/brasil>). A concordância entre o banco de dados coletados juntamente com os produtores e os informados pelo IBGE para os 3 anos agrícolas (2016 – 2019), foi avaliado calculando o erro quadrático médio da raiz (RQME), o erro médio absoluto (EMA) e o RQME também foi calculado como porcentagem (RQME%) da produtividade média relatada pelo produtor.

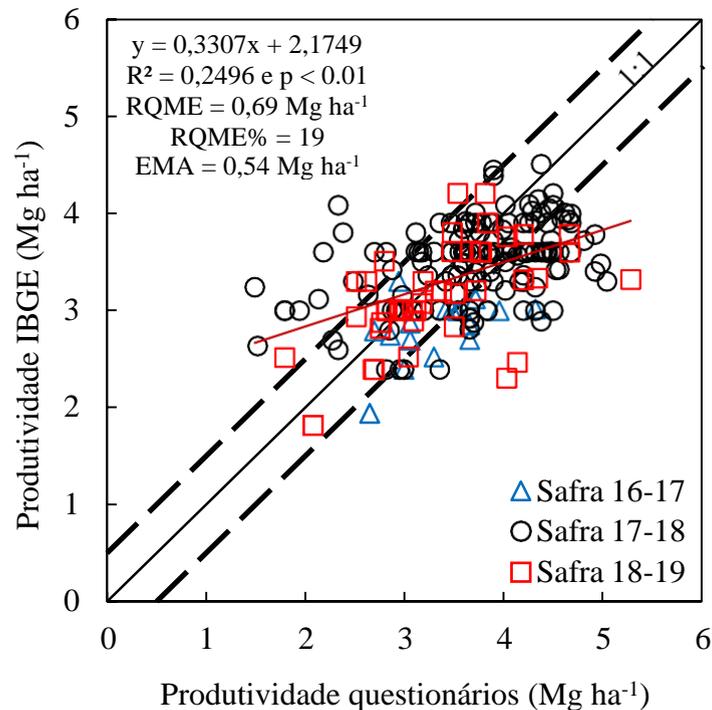


Figura 6: Comparação entre as produtividades informada pelos produtores nos questionários e a produtividade estimada pelo IBGE para o Rio Grande do Sul em 3 anos agrícolas. Também são mostrados a linha 1:1 (linha preta contínua), variação de $\pm 0,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ (linha preta tracejada), regressão linear ajustada (linha sólida vermelha escuro), erro quadrático médio da raiz (RQME), RQME como porcentagem da produtividade média do banco de dados (% RQME) e erro médio absoluto (EMA).

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. As lavouras com produtividade muito baixas devido à incidência de adversidades, tais como granizo, enchente foram excluídas de todas as análises.

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 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 (80 %) e validação (20 %). 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).

3.4 FUNÇÃO LIMITE PARA DATA DE SEMEADURA E DISPONIBILIDADE DE ÁGUA EM RELAÇÃO AO POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE POR FAIXA DE GRUPO DE MATURIDADE RELATIVA.

O conjunto de dados da tabela 1 ($n = 861$) foi dividido em 5 grupos conforme o GMR das cultivares: grupo I ($GMR < 5.5$); grupo II ($GMR 5.5 - 5.9$); grupo III ($GMR 6.0 - 6.4$); grupo IV ($GMR 6.5 - 6.9$) e grupo V ($GMR > 6.9$). Para quantificar a influência da data de semeadura no potencial de produtividade por grupo de GMR foi adotado a metodologia da boundary function proposta por French e Schultz (1984). Para a relação entre data de semeadura (DAS) e potencial de produtividade, um modelo platô linear (ZANON et al., 2016) foi ajustado para o intervalo das máximas produtividades (1):

$$PP_{GMR} = P_o \quad \text{se } X \leq X_o \quad (1)$$

$$PP_{GMR} = P_o - (X - X_o) * b \quad \text{se } X > X_o$$

onde PP_{GMR} é o potencial de produtividade do grupo do GMR, P_o é a produtividade potencial antes da data de início de perda de potencial produtivo, X é o número de dias após 20 de setembro, X_o é o dia (após 20 de setembro) o qual inicia a perda de potencial e b é a penalização

na produtividade com o atraso de semeadura ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$).

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 (i) disponibilidade de água no solo (ASWs), estimado pela textura e profundidade do solo (REICHERT et al., 2009), assumindo-se a ASWs como 75% da capacidade de retenção de água disponível para planta e (ii) precipitação mais irrigação no período da semeadura (SEM) até a maturação fisiológica (R7).

Equações ajustadas para a relação de água disponível e potencial de produtividade por grupo de GMR, para cultivares com $\text{GMR} < 5.5$ (2), $\text{GMR } 5.5 - 5.9$ (3), $\text{GMR } 6.0 - 6.4$ (4), $\text{GMR } 6.5 - 6.9$ (5) e $\text{GMR} > 6.9$ (6):

$$\text{PP}_{\text{GMR} < 5.5} = -0.0000103 * \text{WS}^2 + 0.018712 * \text{WS} - 2.1504 \quad (\text{R}^2 = 0.97 \text{ e } p < 0.01) \quad (2)$$

$$\text{PP}_{\text{GMR } 5.5 - 5.9} = -0.0000085 * \text{WS}^2 + 0.017297 * \text{WS} - 2.4239 \quad (\text{R}^2 = 0.88 \text{ e } p < 0.01) \quad (3)$$

$$\text{PP}_{\text{GMR } 6.0 - 6.4} = -0.0000091 * \text{WS}^2 + 0.017163 * \text{WS} - 2.4782 \quad (\text{R}^2 = 0.96 \text{ e } p < 0.01) \quad (4)$$

$$\text{PP}_{\text{GMR } 6.5 - 6.9} = -0.0000079 * \text{WS}^2 + 0.017082 * \text{WS} - 2.5513 \quad (\text{R}^2 = 0.97 \text{ e } p < 0.01) \quad (5)$$

$$\text{PP}_{\text{GMR} > 6.9} = -0.0000092 * \text{WS}^2 + 0.017925 * \text{WS} - 3.1453 \quad (\text{R}^2 = 0.94 \text{ e } p < 0.01) \quad (6)$$

em que, PP_{GMR} representa o potencial de produtividade do grupo de GMR e WS representa a quantidade de água disponível ao longo do ciclo (SEM – R7).

Valores de WS que forneceram as maiores produtividades para os grupos de GMR nas equações 2 a 6 (quando a função limite estabilizou, ou seja, o acréscimo na produtividade foi inferior a 0,05%) foi a WS mínima para que as produtividades não sejam limitadas por água. A derivada da função limite para um determinado valor de WS representa a produtividade atingível da água (WPA; $\text{Kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$). Um valor médio de WPA foi estimado com base nos valores de produtividade da função limite em toda faixa de WS em que a produtividade foi sensível ao aumento da disponibilidade de água. No presente estudo as funções limites foram ajustadas utilizando o software Table Curve 2.0.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE, POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE LIMITADO POR ÁGUA E LACUNAS DE PRODUTIVIDADES NAS *BUFFER ZONES*

O potencial de produtividade (PP) do Rio Grande do Sul variou de 6,1 a 7,2 Mg ha^{-1} nas

diferentes *BZs* (Figura 7A), as quais representam 67% da área produtiva cultivada com soja no estado. O maior PP foi encontrado na *BZ* II (7,2 Mg ha⁻¹), localizada na região centro-norte do estado, em semeaduras da segunda quinzena de outubro. Este resultado foi encontrado por Zanon et al. (2016) que relataram que os maiores potenciais de produtividade em semeaduras até 04 de novembro para ambiente subtropical. Além disso, este estudo identificou que os menores PP foram observados nas *BZs* VI (6.1 Mg ha⁻¹), VIII (6.1 Mg ha⁻¹) e IX (6.2 Mg ha⁻¹) que representam 12% da área cultivada com soja no estado. Estes locais com menores PP estão relacionados com menor radiação solar, temperaturas médias elevadas e menor coeficiente fototérmico o que é confirmado por Edreira et al. (2017); Grassini et al. (2015b); Zanon et al. (2016).

O potencial de produtividade limitado por água (PPA) apresentou grande variação entre as *BZs* (2,5 até 5,1 Mg ha⁻¹) conforme pode ser observado na Figura 7B, sendo a região norte do estado a que apresentou os maiores PPA (*BZs* I a IV). A região norte do RS apresentou maior quantidade e melhor distribuição de precipitação, (Figura 8F) durante as estações de cultivo, além de possuir como solo predominante os latossolos (classificação brasileira de solos; STRECK et al., 2008) conforme foi observado na Tabela 1. Os latossolos se caracterizam como solos profundos e com maior capacidade de armazenamento de água (STRECK et al., 2008), o que permite suportar períodos mais longos de déficit hídricos. Os resultados encontrados neste estudos são confirmados por Battisti et al. (2017) que estudaram a dinâmica de água nos diferentes tipos de solos no Brasil e encontraram que em perfil de enraizamento mais profundo, os ganhos de produtividade de chegaram a 300 kg ha⁻¹.

A produtividade média (PM) do estado ao longo de 15 anos (2004 – 2019) variou entre as *BZs* de 1,7 a 2,8 Mg ha⁻¹ (Figura 7C). Este comportamento foi muito semelhante ao encontrado para a PPA, sendo as *BZs* I, II e XII as que apresentaram os maiores PMs (2,8, 2,6 e 2,4 Mg ha⁻¹ respectivamente). Estas regiões (*BZs* I, II e XII) apresentaram em comum um acumulado de precipitação próximo aos 600 mm (Figura 8F), valor encontrado por Grassini et al. (2015b) e Zanon et al. (2016), como sendo a quantidade de precipitação suficiente para alcançar altas produtividades. No entanto, este volume de precipitação precisa ser bem distribuído ao longo da estação de crescimento e o solo deve ter boa capacidade de armazenamentos (CAD), para que a cultura da soja não seja limitada por água. Além disso, as *BZs* III, IV e V, também possuíram acumulados médios próximo aos 600 mm (Figura 8F), porém apresentaram as maiores variabilidades de precipitação nas estações de crescimento, com um desvio padrão acima de 200 mm. Já as *BZs* VI, VII, VIII e IX foram as que apresentaram

as menores PMs e tiveram os menores volumes de precipitações na média dos anos, entorno de 400 mm, além disso apresentam solos rasos e com baixa capacidade de armazenamento de água o que impede o armazenamento de uma maior quantidade de água nestes solos (DA ROCHA et al., 2017; SARTORI et al., 2016; STRECK et al., 2008)

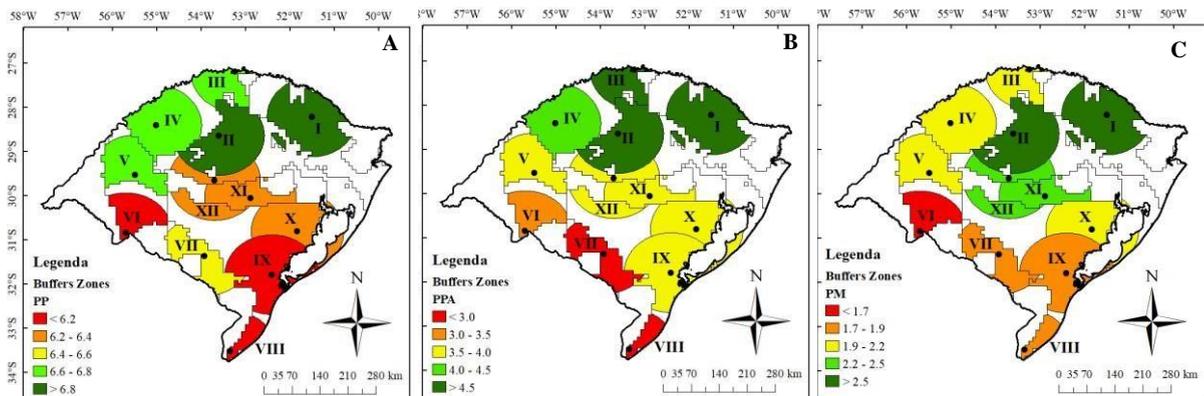


Figura 7: (A) Potencial de produtividade de soja (PP), (B) Potencial de produtividade limitado por água de soja (PPA) e (C) Produtividade média de soja de 15 anos (2004-2019) nas diferentes *buffer zones* do Rio Grande do Sul.

A Figura 8, mostra as variáveis meteorológicas média em 15 anos (2004 – 2019) das *BZs* durante os meses de dezembro a março, os quais coincidem com os períodos mais críticos do desenvolvimento da cultura da soja no Rio Grande do Sul (ZANON et al., 2018). As *BZs* de maiores PP (*BZs* I e II) apresentaram valores de temperatura média (*BZ* I 21,3°C; *BZs* II 23,1 °C) no período reprodutivo (R1 – R7) (Figura 8C), próximos da temperatura ótima descrita por Setiyono et al. (2007) para essa fase de desenvolvimento da cultura, que é de 21,5 °C.

A associação da temperatura próxima aos valores ótimos da cultura com a latitude explicam os maiores potenciais produtivos (*BZs* I e II) (Figura 7). Quando os valores de radiação solar são muito próximos o coeficiente fototérmico é influenciado apenas pela temperatura. A latitude interfere na variação do fotoperíodo e a altitude tem influência nas temperaturas, sendo essas duas variáveis meteorológicas as principais responsáveis pela resposta da maturidade da soja, ou seja, pelo número de dias até a maturação de uma cultivar (ALLIPRANDINI et al., 2009), influenciando diretamente no potencial de produtividade. O coeficiente fototérmico apresentou relação significativa ($R^2 = 0,31$ e $p < 0,01$) com o PP, sendo mais uma variável que ajuda explicar a diferença de PP nas diferentes regiões do estado. Essa relação também foi encontrada por Zanon et al. (2016) ao explicar o PP em função da época de semeadura e do GMR das cultivares. Essa situação também pode ser observada entre as *BZs* VI e VII, que são regiões de mesma latitude e altitude onde o que explica o maior potencial é o

coeficiente fototermal determinado pela menor temperatura média e maior radiação solar.

As *BZs* de menor PP (*BZs* VI, VIII e IX) tiveram este resultado devido duas variáveis meteorológicas: a- *BZs* VIII e IX: apresentaram menor radiação solar o que refletiu em menor acúmulo de fotoassimilados pela planta ao longo do ciclo. b- *BZ* VI: apresentou temperaturas mínimas e médias elevadas (19,5 °C e 24,5 °C respectivamente) (Figura 8A e C), o que resulta em um maior gasto de água pela planta através da transpiração noturna (TAIZ; ZEIGER, 2017).

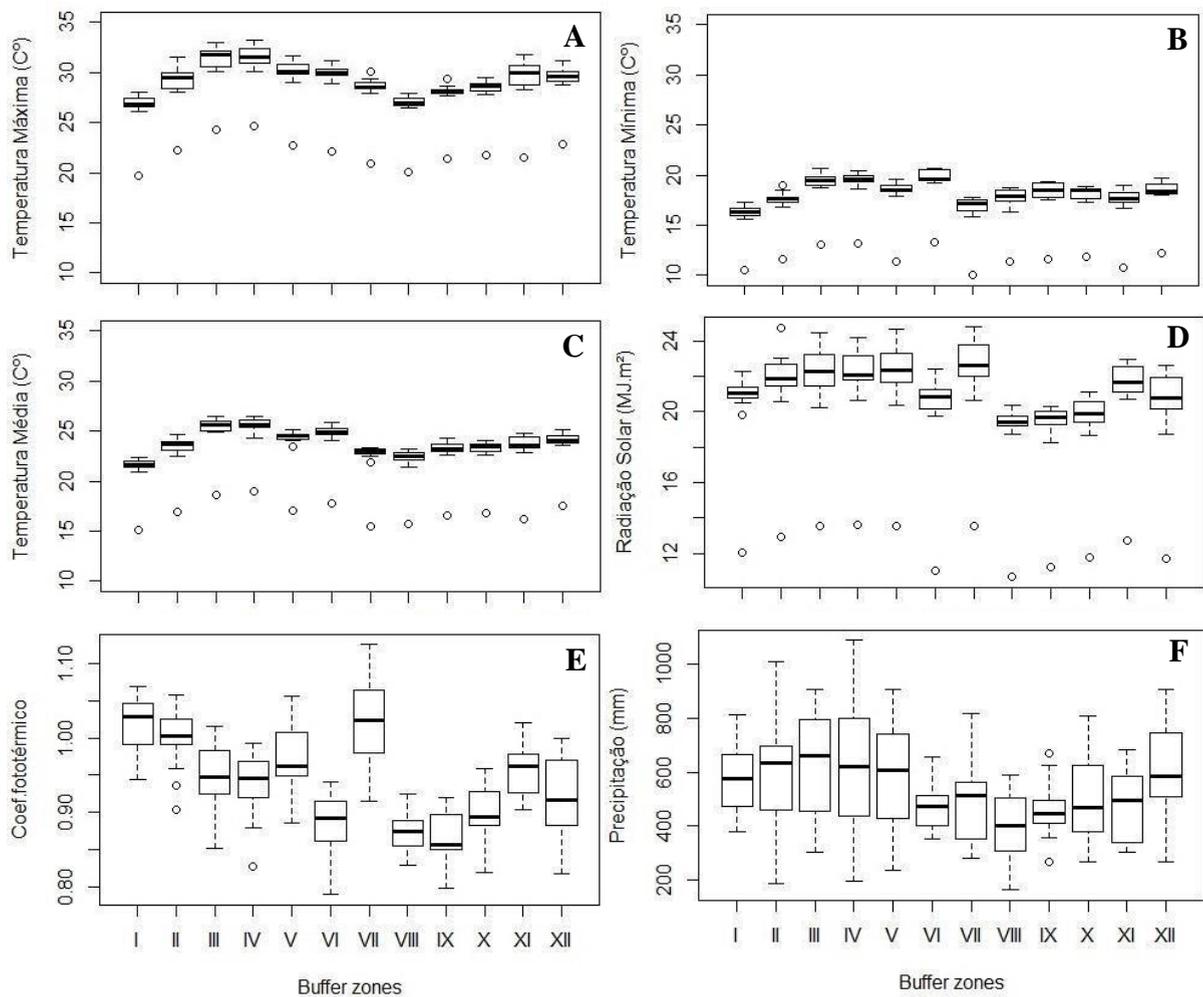


Figura 8: Variáveis meteorológicas médias, (A) Temperatura máxima (°C), (B) Temperatura mínima (°C), (C) Temperatura média (°C), (D) radiação solar (MJ dia⁻¹), (E) coeficiente fototérmico (MJ dia⁻¹ °C⁻¹) e (F) precipitação (mm) para o período de dezembro – março, com exceção do coeficiente fototérmico (R1 até R7), nas diferentes *buffer zones* do Rio Grande do Sul, durante o período 2004 – 2019.

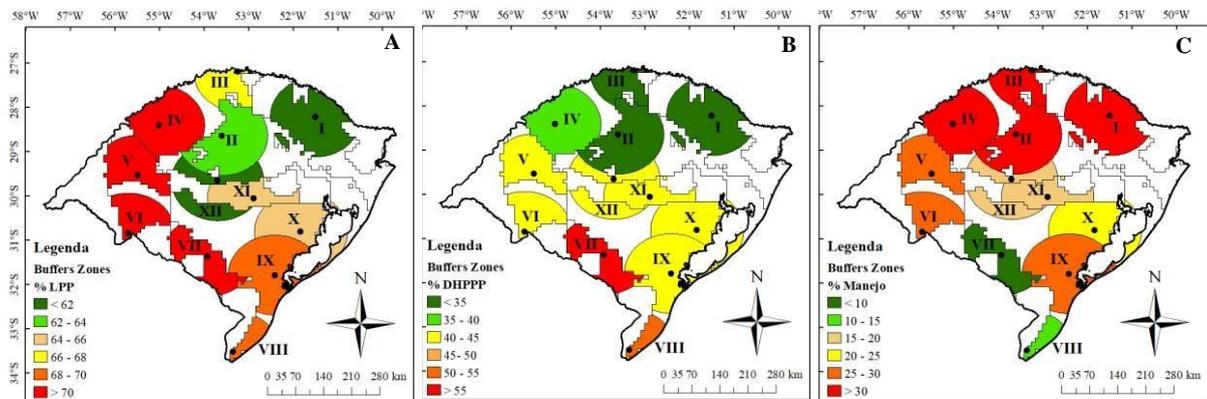


Figura 9: (A) Lacuna de produtividade potencial de soja (%LPPP), (B) contribuição relativa da deficiência hídrica na perda de potencial de produtividade (%DHPPP) e (C) lacuna de produtividade devido ao manejo (LPM) nas diferentes *buffer zones* do Rio Grande do Sul.

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 60% (*BZ I*) a 73% (*BZ VI*) (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 26 a 62% (1,8 a 4,1 Mg ha⁻¹) (Figura 9B), sendo a metade sul do estado (*BZ V* até XII) a região que apresentou a maior contribuição de deficiência hídrica na perda de potencial de produtividade (%DHPPP). As justificativas pela metade sul do estado apresentar grande participação nesta lacuna foram devido as características dos solos (baixa profundidade e baixa CAD) e pela variabilidade interanual na precipitação que ocorre na região.

A perda de PP pelas práticas de manejo apresentou uma menor variação, sendo de 9 a 39% da PP, ou seja, 0,6 a 2,7 Mg ha⁻¹ (Figura 9C). As *BZs I* a *IV* apresentaram as maiores perda de produtividade causadas pelo manejo (variação de 31 a 39%), devido ao %DHPPP destas regiões ter sido menores em relação as outras regiões (Figura 9C), sendo assim, o manejo foi uma das causas da limitação do PP. 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).

4.2 POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE E LACUNAS DE PRODUTIVIDADE NA SOJA NO RIO GRANDE DO SUL

O potencial de produtividade médio ($PP_{\text{médio}}$) (Figura 10) do RS que foi estimado pelo modelo CSM-CROPGRO-Soybean, resultante da média ponderada da área de colheita das BZs, atingindo o valor de $6,6 \text{ Mg ha}^{-1}$, experimentos conduzidos em condição potencial atingiram $6,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ e as máximas produtividades das lavouras atingiram $5,0 \text{ Mg ha}^{-1}$. Esta variação entre os métodos utilizados para estimar os potenciais produtivos, segundo Lobell et al. (2009) é esperada, sendo $PP > PP_E > PP_P$. 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). 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.

São poucos os estudos que abordam os três métodos de definição de potencial, como por exemplo, na Índia onde Aggarwal et al. (2008) compararam as produtividades potenciais por modelo, experimentos e lavouras de produtores para as culturas de arroz, trigo, algodão e mostarda, em todas culturas o potencial produtivo foi maior na estimativa feita pelo modelo, seguida pelos experimentos e pelas máximas produtividade obtida em lavouras. A diferença entre o PP e o PP_E foi de $0,6 \text{ Mg ha}^{-1}$ (-9%) e ainda maior quando comparado com o PP_P , $1,6 \text{ Mg ha}^{-1}$ (-24 %), demonstrando a importância de conhecermos o método que estamos utilizando para estimativa do potencial de produtividade de determinada região.

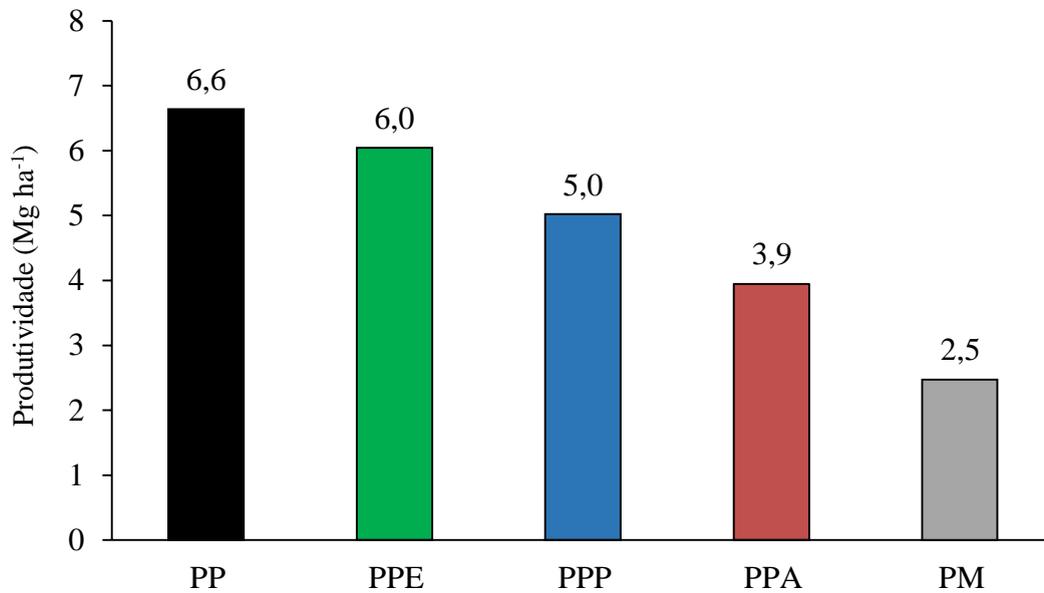


Figura 10: Produtividade de soja no Rio Grande do Sul – Brasil. Coluna preta é o potencial de produtividade estimado pelo modelo (PP), coluna verde é o potencial de produtividade por experimentos (PPE), coluna azul é o potencial de produtividade pelos melhores produtores (PPP), coluna vermelha é o potencial limitado por água (PPA) estimado pelo modelo e a coluna cinza produtividade média (PM) do RS nos últimos 15 anos (2004 – 2019).

O potencial de produtividade limitado por água médio do RS (2004 – 2019) foi de 3,9 Mg ha⁻¹, com um desvio padrão de 2,0 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 15 anos (2004 – 2015) foi de 2,5 Mg ha⁻¹ (CONAB, 2019), com um desvio padrão de +- 0,7 Mg ha⁻¹, valores de PM são baixos mostrando que tem uma 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 (4,1 Mg ha⁻¹ ou 62%) que comparou a PP em relação a PM (lacuna = PP-PM), a segunda lacuna a comparação foi feita entre a PPE e a PM (lacuna = PPE -PM) cujo valor encontrado foi de 3,5 Mg ha⁻¹ ou 58% e a terceira lacuna que foi a menor (2,5 Mg ha⁻¹ ou 50%) foi feita a comparação entre a PPP e a PM (lacuna = PPP -PM) (Figura 10). Nos Estados Unidos, Lobell et al. (2009) identificaram lacunas de produtividade que variaram de 20 a 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 o RS encontra-se com 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 1,4 Mg ha⁻¹ ou 35,9% (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.

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

A análise dos questionários aplicados em 349 lavouras em três anos agrícolas (2016-2019), 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 a 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, e os GMRs menores (< 6.0) apresentam maior potencial de produtividade para o RS, com Grassini et al., (2015a) que relatam relação significativa para o incremento de produtividade em relação ao manejo de fungicida e com Novais e Smyth (1999) relatam que solos tropicais e subtropicais fortemente intemperizados geralmente apresentam baixa biodisponibilidade de P devido à sua alta capacidade de adsorção de P, isso representando a realidade dos solos do RS. Para as variáveis relacionadas ao solo: potássio no solo, teor de matéria orgânica, método de semeadura (convencional) e cultura antecessora de inverno (Azevém e Trigo), sendo que para as AP foi encontrado características

relacionadas ao manejo conservacionista, apenas 13% dos produtores utilizam plantio convencional e optam pela utilização de rotação de cultura no inverno e verão, com a cultura da do trigo e milho respectivamente (Tabela 4), buscando agregar os benéficos da rotação de cultura ao sistema produtivo. Segundo Hennessy (2006), esses benéficos de rotação podem ser atribuídos pela melhoria da estrutura do solo, quebra de ciclos reprodutivos de pragas e melhoria na fertilidade dos solos, tais benéficos são observados nas características comuns dos produtores de AP (Tabela 4).

A rotação de cultura soja – milho mostrou-se positiva, 72 % dos produtores que realizam em suas áreas encontram no grupo dos produtores de AP, além disso esse sistema de produção (soja-milho) apresentou a maior produtividade na cultura da soja (+8.2 %) em relação ao monocultivo (soja-soja). Neste sentido, foi possível identificar que o sistema soja-milho é um sistema promissor em áreas de cultivo de soja no estado do RS, sendo de fundamental importância investir neste sistema, para obter altas produtividades na cultura da soja. Guilpart et al (2017) nos Estados Unidos, identificou o sistema de produção de verão soja-milho como o mais promissor, sendo o mais utilizado no país, onde atingem as maiores produtividades tanto para a cultura da soja, como para a cultura do milho. Farmaha et al. 2016 em seu estudo também apontou acréscimos de 5% na produtividade da soja quanto utilizada rotação com milho.

Outras variáveis que também apresentaram diferença estatística ($p < 0,05$ ou $p < 0,10$) e explicaram as lacunas anteriormente apresentadas, são densidade de plantas estabelecidas, adubação da base, aplicação de potássio complementar de cobertura e controle de plantas daninhas na entressafra para as variáveis da cultura, já para as relacionadas com o solo apresentaram significância, o pH do solo, fósforo no solo, método de semeadura (direto), cultura antecessora de verão (milho) e cultura antecessora de inverno (aveia e aveia + azevém). Relações entre a resposta da produtividade e as variáveis biofísicas e de manejo são extremamente úteis para determinar a probabilidade e a faixa de resposta da produtividade associada a uma mudança ou adoção de uma determinada prática em uma determinada região (CALVIÑO et al., 2003; CALVIÑO et al., 2004).

Tabela 4: Variáveis que explicam as lacunas de produtividades no Rio Grande do Sul. AP representam o grupo das altas produtividades (33% das maiores produtividades), BP representam o grupo das baixas produtividades (33% das menores produtividades) e n representa o número de questionários analisados.

Variáveis	Unidade	n	AP	BP	AP-BP
Características do solo					
pH do solo		164	5.6	5.5	0.1**
Fósforo do solo	mg/dm ³	156	13	10	3*
Potássio do solo	mg/dm ³	157	151	112	39***
MO do solo	%	159	2.9	2.5	0.4***
Plantio direto	%	198	58	42	15**
Plantio convencional	%	31	13	87	-74***
Cultura de verão antecedente					
Soja	%	198	48	52	-4
Milho	%	29	72	28	45**
Cultura de inverno antecedente					
Azevém	%	68	35	65	-29***
Azevém + Aveia	%	51	39	61	-22*
Aveia	%	61	62	38	25**
Trigo	%	36	78	22	56***
Manejo da cultura					
Grupo de maturação		238	5.8	6.2	-0.4***
Data de semeadura	DJ	242	308	318	-9***
Densidade de semeadura	mil sem ha ⁻¹	237	304	300	4
Densidade de plantas	mil pl ha ⁻¹	234	262	246	16**
Data de florescimento	DJ	80	366	386	-20***
Manejo herbicida entre safra	%	76	59	41	18*
Herbicida pré-semeadura	%	200	55	45	10
Herbicida pós-semeadura	%	46	39	61	-22*
Herbicida pós-emergência	%	203	51	49	2
Adubação na base	kg ha ⁻¹	234	293	275	19**
Fertilizante N base	kg ha ⁻¹	234	11	9	2
Fertilizante P base	kg ha ⁻¹	234	77	68	9***
Fertilizante K base	kg ha ⁻¹	234	50	52	-2
Fertilizante K cobertura	kg ha ⁻¹	107	79	68	11**
Inoculação	%	158	49	51	-3
Fungicidas	n°	233	3.6	3.0	0.6***
Inseticidas	n°	229	3.3	2.8	0.5***
Produtividade	kg ha⁻¹	242	4335	2622	1713***

* Significância em $p < 0.1$ (*), $p < 0.05$ (**), $p < 0.01$ (***)

Uma árvore de regressão foi criada e dividida em níveis de produtividade (alto e baixo) e cinco variáveis explicaram 61% (altas produtividades) e 22% (baixas produtividades) a variação de produtividade, sendo elas: data de semeadura, densidade final de plantas, número de aplicação de fungicidas, grupo de maturação das cultivares e adubação na base. Destaca-se que, a data de semeadura foi variável mais importante na variação de produtividade para ambos os níveis, pois em ambas foi a variável de maior significância, estando como principal fator da árvore.

Na Figura 11A a árvore de regressão para altas produtividades mostrou que com épocas de semeadura mais precoces (outubro; $< 23/10$), os produtores alcançaram produtividade maiores ($4,6 \text{ Mg ha}^{-1}$), muito em função de terem usado cultivares com GMR precoce (5.8), esses resultados são condizentes a esse grupo de cultivares estudadas, conforme pode ser visto na Tabela 4. Consequentemente estas semeaduras até $23/10$ apresentaram maior coeficiente fototérmico, o que resultou em maiores produtividades (ZANON et al., 2016). Já para as semeaduras $\geq 23/10$, as lavouras que apresentaram altas produtividades ($4,4 \text{ Mg ha}^{-1}$) aplicaram mais adubação de base ($> 295 \text{ Kg ha}^{-1}$) e aplicaram fungicidas de 3 a 5 vezes, o que evitou a redução de +5,5% da produtividade, em relação as lavouras que utilizaram a mesma adubação na base, porém, tiveram menor número de aplicação de fungicidas (1 a 2 aplicações), devido a maior proteção da cultura a doença, principalmente a *Phakopsora pachyrhizi* (ferrugem asiática). Além disso, quando a adubação de base foi menor que 295 Kg ha^{-1} , a densidade final de plantas passou a ser um fator importante, onde as mais altas produtividades ($4,3 \text{ Mg ha}^{-1}$) foram reportadas em lavouras com densidades maiores que $233 \text{ mil pl ha}^{-1}$, sendo este o principal componente de produtividade da cultura da soja (número de legumes por m^2), que tem grande influência no número final de plantas estabelecidas na lavoura.

Na árvore de regressão para baixas produtividades (Figura 11B) a data de semeadura também foi o principal fator limitante, porém, as maiores produtividades ($3,0 \text{ Mg ha}^{-1}$) são encontradas em semeaduras até o final de novembro ($< 26/11$), utilizando GMR < 6.2 e aplicando de 3 a 5 vezes fungicida, possibilitando com que a produtividade destas lavouras fosse 12% maior em relação as lavouras com 1 a 2 aplicações de fungicida e 19% maior em relação as lavouras que optaram por cultivares com GMR ≥ 6.2 . Este comportamento, foi semelhante ao encontrado para as lavouras com altas produtividades (Figura 11A), que foram semeadas em uma faixa de semeadura maior usando GMR mais tardios, o que resultou em maior estabilidade de produção, porém as maiores produtividades mesmo nos baixos níveis de produtividades foram encontradas em semeaduras no início do período recomendado (outubro

e novembro) e GMRs mais precoce.

No entanto, nas semeaduras das lavouras que foram realizadas em dezembro ($\geq 26/11$), o fator que apresentou maior importância foi a densidade final de plantas, sendo as maiores produtividades expressadas nas lavouras que utilizaram densidades mais elevadas (> 233 mil pl ha⁻¹). Possivelmente a interceptação da radiação solar está relacionada a densidade de plantas em épocas de semeaduras tardias, onde as plantas apresentaram a fase vegetativa reduzida e o índice de área foliar insuficiente para aproveitar ao máximo a radiação solar incidente. Esses resultados estão de acordo com trabalhos que buscam a relação da densidade de plantas e produtividade. Corassa et al. (2018), ressaltaram que para níveis de produtividade baixos ($< 4,0$ Mg ha⁻¹) pode ocorrer aumento em até 18% na densidade de plantas em relação a níveis altos de produtividades ($> 5,0$ Mg ha⁻¹), o que pode explicar essa resposta é a redução da disponibilidade dos recursos ambientais (radiação solar, temperatura) e coincidência com os estágios de desenvolvimento que definem a produtividade (SANTACHIARA et al., 2017; SUHRE et al., 2014)

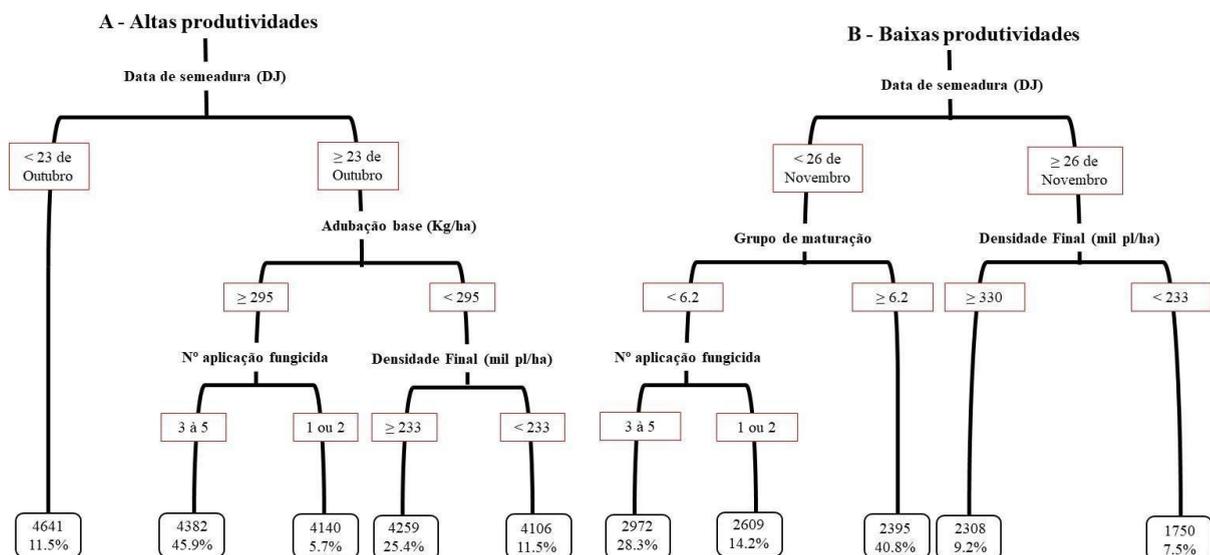


Figura 11: Árvore de regressão mostrando as fontes de variação na produtividade de grãos devido aos fatores biofísicos e de manejo. Caixas são nós de divisão, com caixas inferiores representando nós de terminal. Os valores dentro de cada nó terminal indicam a média da produção de grãos (em kg ha⁻¹) com base em 13% de umidade e a porcentagem de observações em cada nó terminal. (A) altas produtividades (tercil superior) e (B) baixas produtividades (tercil inferior).

4.4 POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE DE ACORDO COM A ÉPOCA DE SEMEADURA E A DEMANDA DE ÁGUA PARA OS DIFERENTES GRUPOS DE MATURIDADE RELATIVA

Os dois principais fatores que provocam as lacunas de produtividade no estado são a limitação por água e a data de semeadura, portanto esses fatores foram estudados com maior profundidade para melhor entender seu comportamento em relação a ampla gama de GMRs cultivados nessas regiões. A época de semeadura como um fator da lacuna de produtividade já encontrado na literatura por Zanon et al. (2016) no sul do Brasil, e por Edreira et al. (2017) e Grassini et al. (2015b) nos Estados Unidos. Nesse estudo abordamos a perda de potencial de produtividade com o atraso de semeadura para diferentes faixas de GMR e observou-se uma perda de potencial para todas as faixas de GMR, porém, em diferentes magnitudes e em diferentes faixas de semeadura. Os GMRs ≤ 5.5 (Figura 12A) apresentaram o maior potencial de produtividade ($6,2 \text{ Mg ha}^{-1}$), reduzindo com o aumento dos GMRs, sendo o menor potencial encontrado nos GMRs mais tardios ($\text{GMR} \geq 7.0$; $5,2 \text{ Mg ha}^{-1}$) (Figura 12E). Estes resultados estão de acordo com Zanon et al. (2016) que relataram para ambientes subtropicais os maiores potenciais de produtividade com GMRs precoces ($\text{GMRs} \leq 5.5$), devido ao maior coeficiente fototérmico.

GMRs ≤ 5.5 (Figura 12A) apresentaram uma menor faixa de semeadura para potenciais produtivos, iniciando final de setembro (20 de setembro) até 23 de outubro, após essa data a perda de PP é de $31 \text{ Kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$. Nos GMRs entre 5.5 a 5.9 (Figura 12B) a faixa de semeadura aumentou em 11 dias (até 03 de novembro), porém, a perda de PP se manteve em $31 \text{ Kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$. Com o aumento da faixa de GMRs (entre 6.0 a 6.4) ocorreu um aumento na janela de semeadura para atingir PP (até 14 de novembro) e a perda de PP foi de $30 \text{ Kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ após 14 de novembro (Figura 12C). Usando GMRs entre 6.5 a 6.9 aumentou-se em mais 5 dias a faixa de semeadura (até 19 de novembro) em relação à anterior (14 de novembro) e a perda de PP diminuiu para $28 \text{ Kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$, e por fim os $\text{GMR} \geq 7.0$, os quais apesar de possuírem o menor PP são os que apresentaram a maior janela de semeadura (até 02 de dezembro) e a perda de PP foi semelhante à da faixa anterior ($28 \text{ Kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$).

Na figura 13A, observa-se que a janela de semeadura para PP aumenta em média 13,6 dias a cada aumento de GMR, mostrando a maior estabilidade produtiva presente em GMRs maiores. Já na Figura 13B observa-se que a perda do PP também reduz em $2 \text{ Kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ com o aumento de cada GMR, confirmando a maior estabilidade dessas cultivares (GMRs tardios). Conhecer o comportamento dos diferentes GMRs ao longo de uma grande faixa de semeadura presente no sul do Brasil, possibilita o melhor posicionamento das cultivares para condições específicas dos produtores, proporcionando a diminuição da lacuna existente com uma prática de manejo que não aumenta em custo para o produtor.

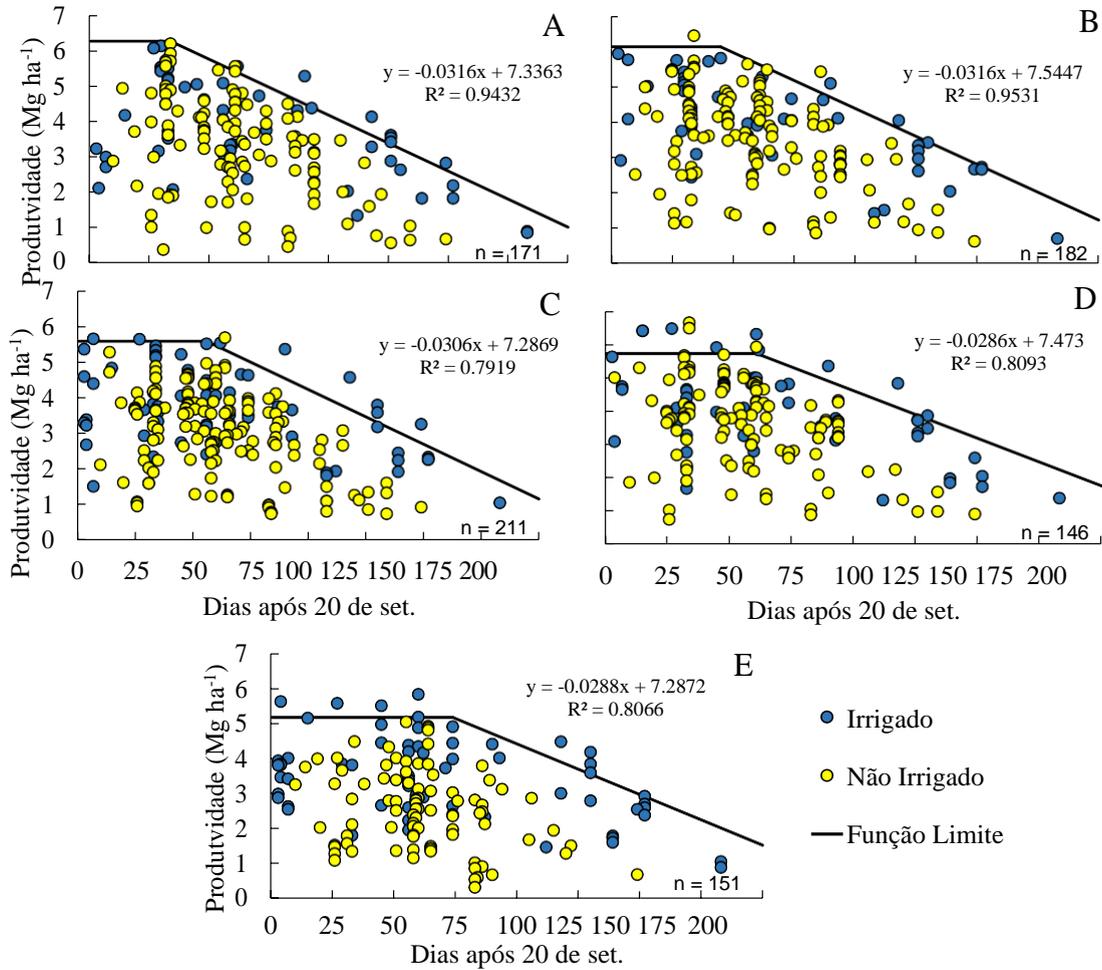


Figura 12: Produtividade de soja (Mg ha⁻¹) em relação a época de semeadura (dias após 20 de setembro) para diferentes faixas de GMR. (A) GMR ≤ 5.5, (B) GMR 5.6 a 6.0, (C) GMR 6.1 a 6.5, (D) GMR 6.6 a 6.9 e (E) GMR ≥ 7.0. Círculos azuis representam experimentos irrigados e círculos amarelos experimentos sem irrigação. Linha sólida preta representa a função limite.

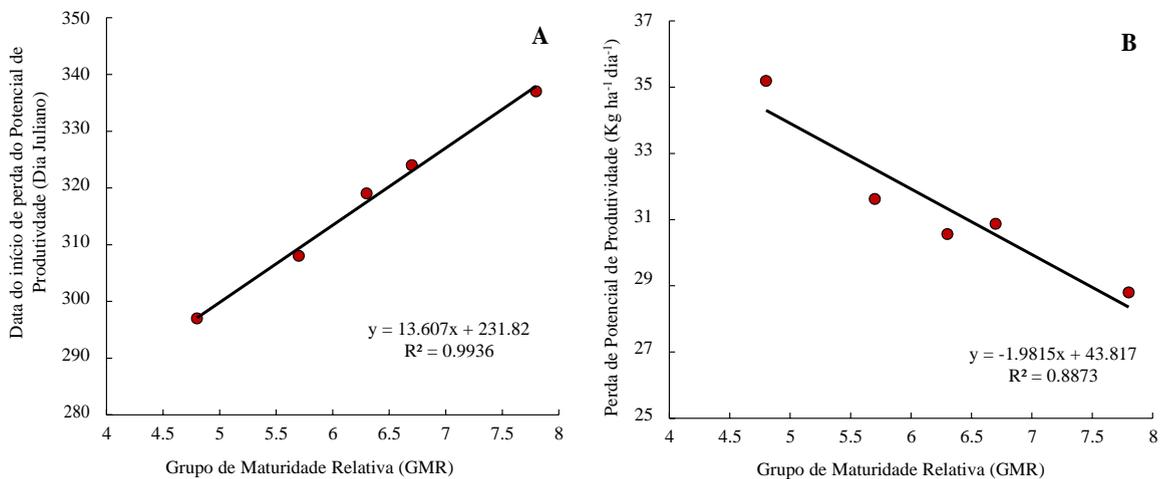


Figura 13: Relação entre a data de início da perda do potencial de produtividade de soja e o grupo de maturidade relativa (GMR) (A) e a perda do potencial de produtividade em kg ha⁻¹ dia⁻¹ e o grupo de maturidade relativa (GMR) (B).

A função limite entre a relação do suprimento de água (WS) com as produtividades (Figura 14) sugeriu que as máximas produtividades e o WS variaram com os GMRs. A WS para atingir produtividades sem limitação hídrica variou de 760 a 880 mm, estes valores estão de acordo com os valores reportados por Zanon et al. (2016) e Grassini et al. (2015b) que apontaram valores de WS = 800 mm para ambientes subtropicais no Brasil e de WS = 650 mm para os Estados Unidos, respectivamente. A necessidade de WS aumentou com o aumento do GMR, uma vez que GMRs maiores apresentaram maior duração de ciclo de desenvolvimento quando semeados em uma mesma época e local (ALLIPRANDINI et al., 2009). Assim aumentando a exigência por água ao longo do ciclo total, conforme mostra a Figura 14, onde os WS para as faixas de GMRs foram: $GMR \leq 5.5 = 760$ mm (Figura 14A), $GMR 5.6$ a $6.0 = 840$ (Figura 14B), $GMR 6.1$ a $6.5 = 795$ mm (Figura 14C), $GMR 6.6$ a $6.9 = 880$ mm (Figura 14D) e $GMR \geq 7.0 = 830$ mm (Figura 14E).

Além da relação da WS com a duração do ciclo, o suprimento de água necessária para atingir produtividades sem limitação de água está associado com o PP de cada cultivares (Figura 14), e a exigência de WS não é linear, devido a faixa de GMRs entre 6.0 a 6.4 e $GMR \geq 7.0$ não apresentarem cultivares com elevado PP conforme encontrado nos demais GMRs. Na Figura 15A foi observado que para cada unidade de acréscimo no GMR a exigência de água aumenta em 24,5 mm no ciclo total da cultura.

A disponibilidade de água mínima (X intercepto na Figura 14) para a produção de biomassa vegetal que suporte os órgãos reprodutivos da cultura, apresentou a mesma tendência, ou seja, para cada unidade de acréscimo do GMR aumentou a exigência de água em 24 mm (Figura 15B), sendo houve variação de 124 mm ($GMR \leq 5.5$) a 195 mm ($GMR \geq 7.0$). Estes valores estão de acordo com os encontrados por Zanon et al. (2016) no Brasil que aponta o valor de 183 mm o mínimo de água disponível ao longo do ciclo para que ocorra produção vegetal e suporte dos órgãos reprodutivos. Estes valores são maiores que os encontrados por Grassini et al. (2015b) (73 mm) nos Estados Unidos, devido a elevada demanda evaporativa do solo na fase vegetativa inicial, momento que o dossel da cultura não fecha completamente as entrelinhas.

A derivada da função limite para um determinado WS representa a produtividade da água atingível (WPA; $Kg\ ha^{-1}\ mm^{-1}$). A WPA estimada para $GMRs \leq 5.5$ foi de $9.6\ Kg\ ha^{-1}\ mm^{-1}$ (Figura 14A), $GMRs$ entre 5.6 a 6.0 = $8,9\ Kg\ mm^{-1}$ (Figura 14B), $GMRs$ entre 6.1 a 6.5 = $8,5\ Kg\ ha^{-1}\ mm^{-1}$ (Figura 14C), $GMRs$ entre 6.6 a 6.9 = $8,8\ Kg\ ha^{-1}\ mm^{-1}$ (Figura 14D) e $GMRs \geq 7.0 = 8,5\ Kg\ ha^{-1}\ mm^{-1}$ (Figura 14E). Estes valores foram estimados a partir da primeira

derivada da função limite em toda a gama de WS que a produtividade foi sensível ao aumento do suprimento de água. Valores de WPA encontrados na literatura para culturas leguminosas e oleaginosas trouxeram valores de 7 a 13 $\text{Kg ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$ nos Estados Unidos reportados por Connor et al. (2011), 9,9 $\text{Kg ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$ no Corn Belt dos Estados Unidos reportado por Grassini et al. (2015b) e 9,1 $\text{Kg ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$ para regiões de ambientes subtropicais reportado por Zanon et al. (2016).

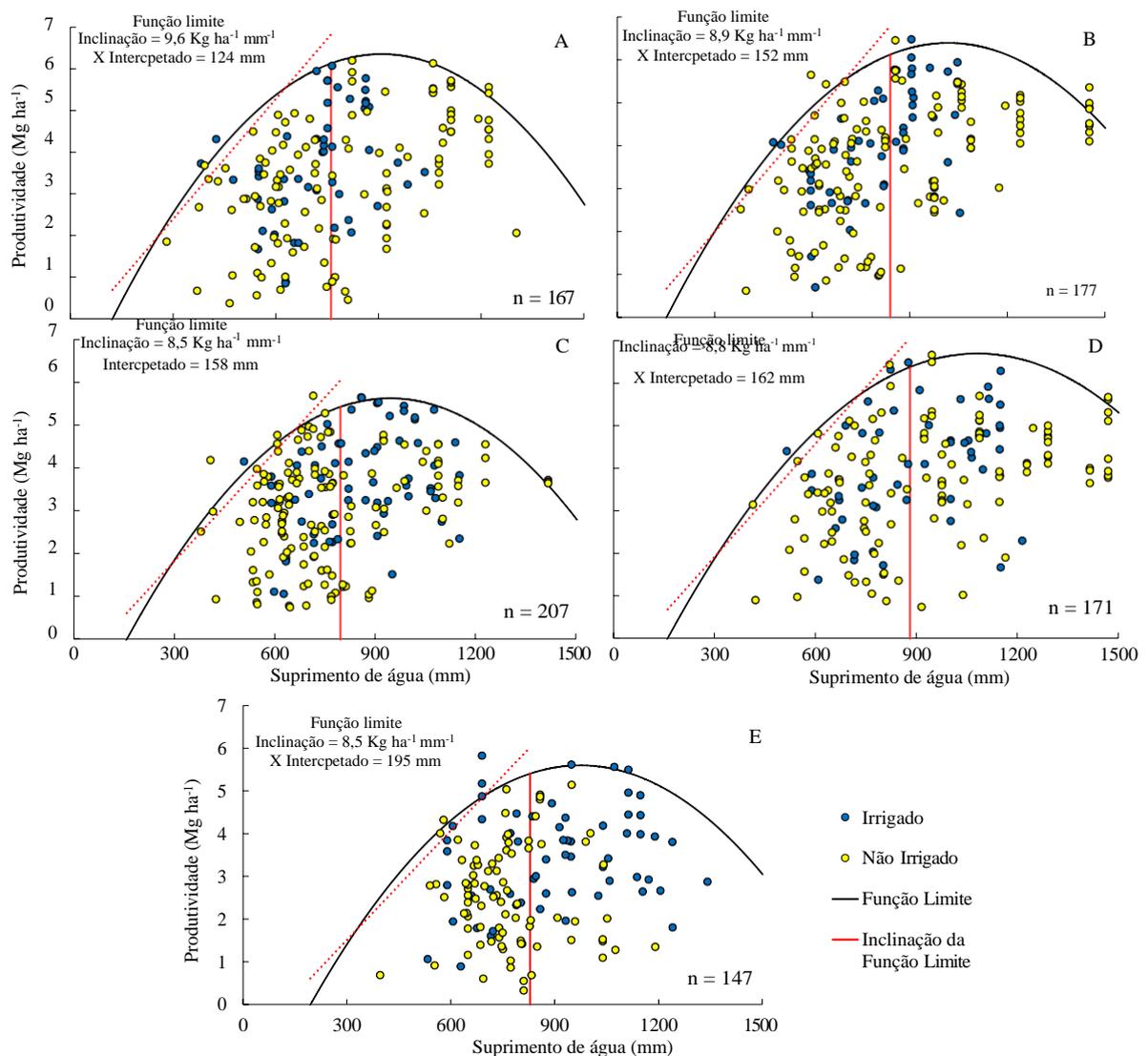


Figura 14: Produtividade de soja (Mg ha^{-1}) em relao ao suprimento de gua (mm) durante a estao de cultivo (SEM – R7) para diferentes faixas de GMR. O suprimento de gua foi estimado como a soma da gua disponvel no solo na semeadura, precipitao e irrigao total. (A) GMR ≤ 5.5 , (B) GMR 5.6 a 6.0, (C) GMR 6.1 a 6.5, (D) GMR 6.6 a 6.9 e (E) GMR ≥ 7.0 . Crculos azul representa experimentos irrigados e Crculos amarelos experimentos sem irrigao. Linha slida preta representa a funo limite, linha slida vermelha representa a estabilizao da funo limite, na qual o acrscimo na produtividade  inferior 0.05% e linha tracejada vermelha representa a inclinao da funo limite.

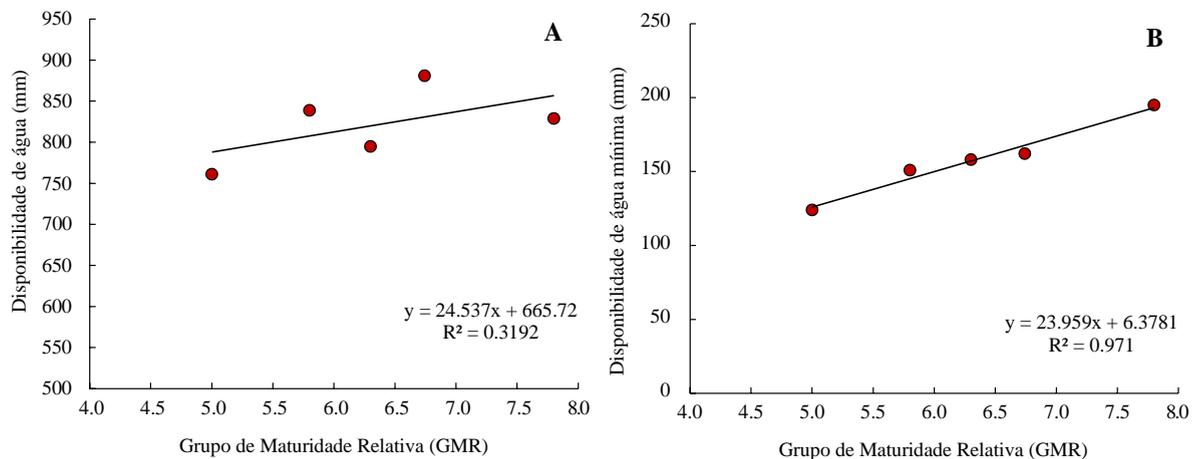


Figura 15: Disponibilidade de água (WS) ao longo do ciclo (SEM – R7) em relação ao grupo de maturidade relativa (GMR) (A) e disponibilidade de água mínima ao longo do ciclo (SEM – R7) em relação ao grupo de maturidade relativa (GMR) (B).

A partir deste estudo, os consultores técnicos e agricultores poderão tomar decisões de manejo com base em informações do real potencial de produtividade de sua região, e trabalhar em fatores agora conhecidos que estão causando as lacunas de produtividade, assim aumentando a eficiência no uso de recursos, a produtividade e o lucro do produtor, uma vez, que projeções da FAO (Food and Agriculture Organization) apontam para um incremento populacional de aproximadamente 30% até 2050, como consequência a exigência para o aumento na produção mundial de até 60% para 2050 (ALEXANDRATOS; BRUINSMA, 2012). Porém estudos futuros que abordam a relação de época de semeadura x GMR x densidade de plantas, uns dos principais causadores da lacuna de produtividade, visando maximizar a eficiência na interceptação solar, através do ajuste populacional para diferentes GMRs em época de semeadura a fim de obterem índice de área foliar ótimos (TAGLIAPIETRA et al., 2018; ZANON et al., 2018) é fundamental para diminuirmos a lacuna produtiva, aumentando a eficiência no uso de recursos, diminuindo o impacto ambiental e aumentando a produção mundial de alimentos.

5. CONCLUSÃO

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

(i) o potencial de produtividade variou de 6,1 a 7,2 Mg ha⁻¹ nas diferentes regiões e de 2,5 a 5,1 para o PPA, sendo o PPA médio do estado 6,6 Mg ha⁻¹ e o PPA médio de 3,9 Mg ha⁻¹;

(ii) a lacuna causada pela deficiência hídrica (%DHPPP) variou de 26 a 62% do PP (1,8 a 4,1 Mg ha⁻¹) nas diferentes regiões e a lacuna causada pelo manejo variou de 9 a 39% do PP (0,6 a 2,7 Mg ha⁻¹), sendo a lacuna média do estado oriunda da %DHPPP igual a 41% (2,7 Mg ha⁻¹) e a lacuna de manejo igual a 21% (1,4 Mg ha⁻¹);

(iii) a época de semeadura foi o principal fator causador da lacuna de manejo e juntamente com o GMR, adubação na base, aplicação de fungicida e densidade final de plantas explicaram 61% (altas produtividades) e 22% (baixas produtividades) da lacuna existente;

(iv) o potencial de produtividade variou de 6,2 a 5,2, do GMR mais precoce (GMR ≤ 5.5) ao mais tardio (GMR ≥ 7.0), sendo que a janela de semeadura para potencial de produtividade foi maior nos GMR tardio (GMR ≥ 7.0);

(v) a necessidade de suprimento de água variou de 760 a 880 mm, quanto maior o GMR maior a necessidade de água, portanto a eficiência do uso da água foi maior nos GMR ≤ 5.5 (9,6 Kg ha⁻¹ mm⁻¹) quando comparado com GMR ≥ 7.0 (8,5 Kg ha⁻¹ mm⁻¹).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGGARWAL, P. K. et al. Global Theme on Agroecosystems Quantification of Yield Gaps in Rain-fed Rice, Wheat, Cotton and Mustard in India. **International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics**. 36 pages, [s. l.], n. 43, p. 36, 2008.
- ALEXANDRATOS, N.; BRUINSMA, J. **World agriculture towards 2030/2050: the revision**. Rome: FAO, 2012. 147p.
- 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.
- BLOUNT, J. L.; BUNTIN, G. D.; ROBERTS, P. M. Effect of Planting Date and Maturity Group on Soybean Yield Response to Injury by *Megacopta cribraria* (Hemiptera: Plataspidae). **Journal of economic entomology**. v.109, n. 1, p. 207-212, 2015.
- 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.
- BOURNE, J.K.Jr. The next breadbasket. **National Geographic**, v226, p.46-77, 2014.
- 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.
- CAFARO LA MENZA, N. et al. Is soybean yield limited by nitrogen supply? **Field Crops Research**, [s. l.], v. 213, n. August, p. 204–212, 2017.
- CALVIÑO, P.A., ANDRADE, F.H., SADRAS, V.O. Maize yield as affected by water availability, soil depth, and crop management. **Agronomy Journal**, v.95, n.2, p.275–281, 2003.
- CALVIÑO, P. et al. 2004. Yield responses to narrow rows as related to interception of radiation and water deficit in sunflower hybrids of varying cycle. **Field Crops Research**,

v.88, p.261–267,2004.

CASSMAN, K.G. Ecological intensification of cereal production systems: yield potential, soil quality, and precision agriculture. **Proc. Natl. Acad. Sci. USA**, v96, p.5952–5959, 1999.

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.

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, 2019. Online. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras>>. Acesso em: 10 de out. de 2019.

CONNOR, D.J. et al. **Crop Ecology. Productivity and Management in Agricultural Systems**. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK. 2011.

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.

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 Agropecuaria Brasileira**, [s. l.], v. 52, n. 5, p. 293–302, 2017.

DA SILVA ANDREA, M.C. et al. Adjustment and evaluation of cropgro-soybean and ceres-maize for different genetic material in a region of Mato Grosso State, Brazil. **Tropical and Subtropical Agroecosystems**. v.22, n.1, p.189-201, 2019.

DENG, N. et al. Closing yield gaps for rice self-sufficiency in China. **Nature Communications**, [s. l.], v. 10, n. 1, p. 1–9, 2019.

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.

EVANS, L.T., 1993. **Crop Evolution, Adaptation, and Yield**. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

FARMAHA, B.S. et al. Rotation Impact on On-Farm Yield and Input-Use Efficiency in High-Yield Irrigated Maize–Soybean Systems. **Agronomy Journal**, v.108, p.2313-2321, 2016.

FAO and DWFI. Yield gap analysis of field crops – Methods and case studies, by Sadras. **FAO Water Reports**, n 41, Roma – Italia, 2015.

FAO. FAOSTAT: **Agricultural production. [Database.]** FAO, Rome. Disponível em: <<http://faostat.fao.org/>>. Acesso em: 10 de out. de 2019.

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.

FRENCH, R. J.; SCHULTZ, J. E. Water use efficiency of wheat in a Mediterranean-type environment. I. The relation between yield, water use and climate. **Australian Journal of Agricultural Research**, [s. l.], v. 35, n. 6, p. 743–764, 1984.

GLOBAL YIELD GAP ATLAS. **Global Yield Gap and Water Productivity Atlas**, 2016. Disponível em: <http://www.yieldgap.org/>. Acesso:19 de nov. de 2019.

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.

HENNESSY, D.A. On monoculture and the structure of crop rotations. **Amer. J. Agricultural Econom**, v.88, n.4, p.900–914, 2006.

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

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**, Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/pesquisas/pam/default.asp?o=18&i=P>. Acesso em: 30 out. 2019.

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.

MARCON, E. C et al. Uso de diferentes fontes de nitrogênio na cultura da soja. **Revista Thema**, Pelotas, v. 14, n. 2, p. 298-308, 2017.

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.

MONTEIRO, L.A.; SENTELHAS, P.C. Calibration and testing of an agrometeorological model for the estimation of soybean yields in different Brazilian regions. **Acta Scientiarum**. v. 36, n. 3, p. 265-272, 2014.

MOURTZINIS, S. et al. Planting date, Maturity and temperature effects on soybean seed yield and composition. **Agronomy Journal**, v.109, n. 5, 2017.

MUELLER N.D. et al. Closing yield gaps: nutrient and water management to boost crop production. **Nature**, v. 490, p. 254–257, 2012.

NOVAIS, R. F., SMYTH, T. J. Fósforo em solo e planta em condições tropicais. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil, 1999.

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

REICHERT, J.M et al. Estimation of water retention and availability in soils of Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v.33, p.1547–1560, 2009.

RICHTER, G. L. et al. Estimativa da área de folhas de cultivares antigas e modernas de soja por método não destrutivo. **Bragantia**, [s. l.], v. 73, n. 4, p. 416–425, 2014.

SANTACHIARA, G.; BORRÁS, L.; ROTUNDO, J. L. Physiological processes leading to similar yield in contrasting soybean maturity groups. **Agronomy Journal**, [s. l.], v. 109, n. 1, p. 158–167, 2017.

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.

- 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.
- 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. SimulArroz: um aplicativo para estimar a produtividade de arroz no Rio Grande do Sul. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO**, 8., 2013, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria/RS: SOSBAI, 2013. p.1618-1627.
- 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.
- SUHRE, J. J. et al. Soybean yield partitioning changes revealed by genetic gain and seeding rate interactions. **Agronomy Journal**, [s. l.], v. 106, n. 5, p. 1631–1642, 2014.
- TAGLIAPIETRA, E. L. et al. Optimum leaf area index to reach soybean yield potential in subtropical environment. **Agronomy Journal**, [s. l.], v. 110, n. 3, p. 932–938, 2018.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4.ed. Porto Alegre:Artemed, 2017.
- 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.
- 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 BUSSEL, L. G. J. et al. Simulation of the phenological development of wheat and maize at the global scale. **Global Ecology and Biogeography**, [s. l.], v. 24, n. 9, p. 1018–1029, 2015.
- 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.

VAN WART, J. et al. Use of agro-climatic zones to upscale simulated crop yield potential. **Field Crops Research**, [s. l.], v. 143, p. 44–55, 2013.

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

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.

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.