

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

**Patric Scolari Weber**

**POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE EM SOJA LIMITADA POR  
NITROGÊNIO EM AMBIENTE SUBTROPICAL**

**Santa Maria, RS  
2020**

**Patric Scolari Weber**

**POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE EM SOJA LIMITADA POR NITROGÊNIO EM  
AMBIENTE SUBTROPICAL**

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

Weber, Patric Scolari  
POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE EM SOJA LIMITADA POR  
NITROGÊNIO EM AMBIENTE SUBTROPICAL / Patric Scolari  
Weber.- 2020.  
41 p.; 30 cm

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

1. Glycine max 2. Ureia 3. Grupo de maturidade  
relativa 4. Fixação biológica de nitrogênio I. Streck,  
Nereu Augusto II. Título.

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

---

© 2019

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

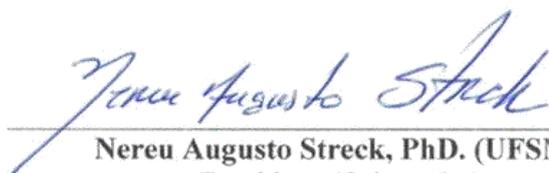
Endereço: Rua Mariano de Freitas, n. 165, Três Mártires, Júlio de Castilhos, RS. CEP: 98130-000. Fone: (55) 9 9949.5433. E-mail: patric.weber@hotmail.com

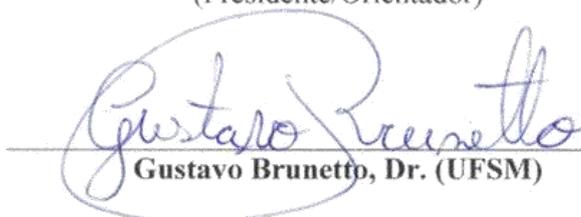
Patric Scolari Weber

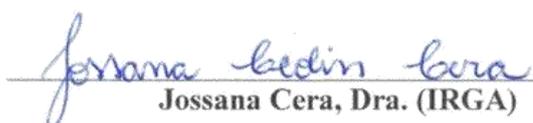
**POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE EM SOJA LIMITADA POR NITROGÊNIO EM  
AMBIENTE SUBTROPICAL**

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 03 de fevereiro de 2020:**

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

  
\_\_\_\_\_  
**Gustavo Brunetto, Dr. (UFSM)**

  
\_\_\_\_\_  
**Jossana Cera, Dra. (IRGA)**

Santa Maria, RS  
2020

## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho aos meus pais, Volmir e Marisa, a minha irmã Paola, por todo amor, carinho e incentivo ao longo destes anos.*

*Dedico aos meus avós (in memoriam) Lídia, Florentino e Venilda, pois lá do céu me guiam e rezam por mim.*

*Dedico!*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida.

Aos meus pais, Volmir e Marisa, e a minha irmã Paola por serem minha base para tudo, pelo apoio, incentivo e paciência.

Aos meus tios, tias e primos por sempre estarem comigo.

Aos meus amigos.

Aos professores Nereu Augusto Streck e Alencar Junior Zanon por toda dedicação, ensinamentos e empenho na orientação.

Aos colegas de grupo de pesquisa, integrantes das Equipes FieldCrops, Simanihot e Phenoglad.

Aos colegas e amigos do Grupo Soja pela condução dos experimentos, tabulação e análise dos dados.

A Universidade Federal de Santa Maria, Departamento de Fitotecnia e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola por poder realizar o Mestrado e este trabalho.

A Sementes Aurora, Agropecuária Cechin, Grupo Ceolin, Equipe FieldCrops-Zona Sul pela disponibilidade de condução dos experimentos em suas áreas.

Ao Laboratório de Pesquisa em Leites e Derivados pela ajuda nas análises laboratoriais.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola pelos ensinamentos.

Ao CNPq pelo auxílio de concessão da bolsa de mestrado.

Muito obrigado!

*Pedras no caminho? Eu guardo todas. Um dia  
vou construir um castelo.*

*(Nemo Nox)*

## RESUMO

### POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE EM SOJA LIMITADA POR NITROGÊNIO EM AMBIENTE SUBTROPICAL

AUTOR: Patric Scolari Weber  
ORIENTADOR: Nereu Augusto Streck

A cultura da soja ocupa posição de destaque na agricultura mundial, sendo a segunda maior fornecedora de óleo vegetal para alimentação humana e a principal fonte de proteínas, cerca de 40%, para a alimentação de animais e pessoas. Logo, é considerada uma cultura chave na segurança alimentar global. O Rio Grande do Sul, localizado na Região Sul, é o terceiro maior produtor de soja com aproximadamente, 17% da produção nacional. Atender a demanda de soja na área agrícola existente para uma população global de 9,7 bilhões de pessoas até o ano 2050 pressionará a redução da lacuna existente entre a produtividade média do produtor e o potencial de produtividade (PP). Dessa forma, buscando o PP das culturas, a disponibilidade de nitrogênio (N) não poderá ser um fator limitante, já que é um elemento essencial para a maioria das culturas, pois é constituinte de várias moléculas importantes para seu desenvolvimento. Sendo o Brasil o 2º maior produtor mundial de soja e com a iminente pressão por aumento de produtividade, estudos com metodologias inéditas no Brasil, que visam o aumento da produtividade, como o deste trabalho, vem a dar um novo limiar de conhecimento sobre a adubação nitrogenada na cultura da soja no Brasil. O objetivo do trabalho foi determinar se o N é um fator limitante para altas produtividades com diferentes grupos de maturidade relativa da cultura da soja em ambiente Subtropical no Brasil. A metodologia seguiu a curva de absorção de N pela cultura da soja, onde foram aplicados N (fonte ureia) em 5 momentos: V2, V4, R1, R3 e R5. Os experimentos foram conduzidos nas safras de 2017/2018 e 2018/2019, em lavouras comerciais de soja, com alto potencial produtivo, nos municípios de Cruz Alta, Júlio de Castilhos, Santa Maria, Uruguaiana e Pelotas, ambas no estado do RS. Os resultados obtidos mostram que cultivares com  $GMR \leq 5.5$  tiveram as maiores produtividades quando se aplicou o N. Cultivares com  $GMR > 5.5$  aumentaram pouco ou não teve ganhos de produtividade. Os teores de proteína nos grãos foram maiores aonde aplicou-se N, especialmente nos ambientes em que tiveram as menores produtividades. O teor de óleo foi pouco afetado, porém, foi diminuído aonde se teve aumento de proteína nos grãos. Este estudo fornece uma estrutura para avaliar as limitações de nitrogênio na soja com diferentes grupos de maturidade relativa. No presente estudo, seguimos o protocolo de fertilização nitrogenada, afim de garantir que o N não fosse limitante para uma produtividade potencial da soja. O protocolo foi implementado com vários GMRs, que representam em sua maioria, as mais utilizadas no estado do Rio Grande do Sul.

**Palavras-chave:** *Glycine max*. Ureia. Grupo de maturidade relativa. Fixação biológica de nitrogênio.

## ABSTRACT

### NITROGEN-LIMITED SOYBEAN PRODUCTIVITY POTENTIAL IN A SUBTROPICAL ENVIRONMENT

AUTHOR: Patric Scolari Weber  
ADVISOR: Nereu Augusto Streck

Soybean is a key crop in world agriculture, being the second largest supplier of vegetable oil for human consumption and the main source of protein, about 40%, to feed animals and people. Rio Grande do Sul, located in Southern Brazil, is the third largest soybean producer, with approximately 17% of national production. Meeting the demand for soybean in the existing agricultural area for a global population of 9.7 billion people by the year 2050 implies closing the gap between average production and production potential (PP). Thus, for pursuit of crop PP, nitrogen (N) availability cannot be a limiting factor, as it is an essential element for most crops, as it is a constituent of several molecules important for their development. As Brazil is the 2nd largest soybean producer world wide, studies with new methodologies in Brazil that aim to increase the studies, as or what it does, comes a new limit of knowledge about Nitrogen fertilization in Brazil. The objective of this study was to determine if nitrogen is a limiting factor for high soybean yields in the Subtropical environment of Brazil. Following the a curve of N uptake by soybean, N (as urea) was applied at 5 times: V2, V4, R1 R3 and R5. The experiments were carried out during the 2017/2018 and 2018/2019 growing seasons in soybean crops with high production potential in the counties of Cruz Alta, Júlio de Castilhos, Santa Maria, Uruguaiana and Pelotas, in the State of Rio Grande do Sul. The results showed that cultivars with GMR  $\leq 5.5$  had the highest yields with applied N. Cultivars with GMR  $> 5.5$  did not respond to applied N. Protein content in the grains were higher where N is applied, especially in the environments with the lowest yields. The oil content was little affected and slightly, decreased with protein content increase in the grains. This study selected a framework for assessing nitrogen limitations in soybeans with different relative maturity groups. In the present study, we followed a nitrogen fertilization protocol, ensuring that N was not limited to a potential soybean potential. The protocol was implemented with several GMRs that represent the majority, as well as most used in the state of Rio Grande do Sul.

**Keywords:** *Glycine max.* Urea. Relative maturity group. Biological nitrogen fixation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa do estado do Rio Grande do Sul (RS), Brasil. A localização dos locais experimentais está em cores sólidas no mapa, sendo azul: Cruz Alta; roxo: Júlio de Castilhos; amarelo: Santa Maria; verde: Uruguaiana e vermelho: Pelotas. Inserção indica a localização do RS no Brasil.....	22
Figura 2 - Precipitação e temperatura (mínima, média e máxima) de todos os locais nas safras 2017-2018 e 2018-2019, referente aos meses de agosto até março.....	23
Figura 3- Produtividade de soja nos tratamentos com N e N. Cada ponto, representa o rendimento médio de um determinado ano $\times$ data de semeadura $\times$ GMR. A linha diagonal sólida indica $y = x$ . Parâmetros da regressão linear ajustada (linha sólida verde – amarela - vermelha) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) também são mostrados .....	29
Figura 4 - Teor de proteína (a), teor de óleo (b), produtividade de proteína (c) e produtividade de óleo (d). Eixo X sem aplicação de N e eixo Y com aplicação de N. Linha diagonal sólida representa $Y=X$ . Cada ponto de dado representa a média de um experimento .....	33
Figura 5 - Figura da esquerda (a) é apresentado no eixo X o grupo de maturidade relativa (GMR) e no eixo Y o teor de proteína (%). Na figura da direita (b) o eixo X é a produtividade dos experimentos e no eixo Y é o teor de proteína (%). Cada ponto representa a média de um experimento. As linhas sólidas (verde – tratamento com N e vermelha – tratamento sem N) são as linhas de regressão para cada conjunto de dados e o $R^2$ é mostrado.....	34

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Experimentos com nitrogênio na cultura da soja, conduzidos durante dois anos agrícolas (2017/2018 e 2018/2019) em 5 locais do estado do Rio Grande do Sul – Brasil. ....	23
Tabela 2 - Atributos químico de análises de solo extraídos de camadas de 0 – 20 cm de solo dos experimentos conduzidos nas safras de 2017-2018 e 2018-2019.....	26

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA</b> .....	12
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	14
2.1	OBJETIVO GERAL .....	14
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	14
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	15
3.1	IMPORTÂNCIA DA CULTURA DA SOJA .....	15
3.2	ECOFISIOLOGIA DA SOJA, GRUPO DE MATURODADE RELATIVA E ÉPOCA DE SEMEADURA .....	15
3.3	POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE .....	16
3.4	CICLO DO NITROGÊNIO .....	17
3.5	FIXAÇÃO BIOLÓGICA DO NITROGÊNIO E USO DE NITROGÊNIO EM COBERTURA NA CULTURA DA SOJA .....	18
<b>4</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	22
4.1	EXPERIMENTOS DE CAMPO .....	22
4.2	CRUZ ALTA .....	24
4.3	SANTA MARIA .....	24
4.4	JÚLIO DE CASTILHOS .....	25
4.5	PELOTAS .....	25
4.6	URUGUAIANA .....	26
4.7	PROTOCOLO DE APLICAÇÃO DE NITROGÊNIO .....	26
4.8	AVALIAÇÕES .....	28
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	29
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	35
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	36
	<b>APÊNDICE A - FOTOS DA CONDUÇÃO DOS EXPERIMENTOS DE NITROGÊNIO</b> .....	41

## 1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A principal oleaginosa cultivada no mundo é a cultura da soja (*Glycine max* (L.) Merr.), por ser utilizada como fonte de proteína, cerca de 40%, e óleo para alimentação humana e animal, representando 56% da produção total de sementes oleaginosas no mundo (FAO, 2019). Por isso, se considera uma cultura chave na segurança alimentar global (MENZA *et al.*, 2017). Na safra 2018/2019 a produção de soja no Rio Grande do Sul (RS) foi de 17,5 milhões de toneladas de soja (CONAB, 2019).

Estudos referentes à crescente demanda por alimentos no Mundo apontam para a necessidade de expansão das novas áreas agrícolas e, principalmente, para a necessidade de elevar as produtividades das culturas (ROYAL SOCIETY, 2009; VAN ITTERSU *et al.*, 2013). Portanto, estudos referentes a práticas de manejo, utilização adequada de insumos são de extrema importância para alcançar o potencial de produtividade (PP) das culturas agrícolas.

O potencial de produtividade (PP), ou a produtividade potencial é a produtividade de uma cultivar que cresce e se desenvolve sem limitações nutricionais, físicas, bioquímicas, bióticas e abióticas, ou seja, sua produtividade será determinada pelas condições climáticas do local e a genética do cultivar. Dessa forma, buscando o potencial produtivo das culturas, a disponibilidade de nitrogênio (N) não poderá ser um fator limitante, já que é um elemento essencial para a maioria das culturas, pois é constituinte de várias moléculas importantes para seu desenvolvimento, como proteínas, ácidos nucleicos, alguns hormônios e clorofila (EPSTEIN, 1999). Os grãos de soja apresentam um teor médio de 6.5% N, desse modo, para produzir 1000 kg de grãos de soja são necessários 65 kg de N. Além disso, folhas, caules e raízes demandam cerca de 15 kg de N, indicando a necessidade total de, aproximadamente, 80 kg de N (SALVAGIOTTI *et al.*, 2008; TAMAGNO *et al.*, 2017). Conseqüentemente, para a obtenção de rendimentos de 3000 kg de grãos ha<sup>-1</sup> são necessários 240 kg de N, dos quais 195 kg são retirados da lavoura através da exportação pelos grãos (HUNGRIA; CAMPO; MENDES, 2001).

O N é um nutriente essencial requerido por todos os organismos vivos e, frequentemente, limita a produção primária em ecossistemas aquáticos e terrestres. Este elemento é necessário em grandes quantidades, uma vez que é componente essencial de proteínas, ácidos nucleicos e de outros constituintes celulares (VIEIRA, 2017). As principais fontes fornecedoras do N necessário à cultura da soja são o N do solo, proveniente da mineralização da matéria orgânica, o N fornecido por fertilizantes e o N fornecido pelo processo da fixação biológica do nitrogênio atmosférico (N<sub>2</sub>) (HUNGRIA *et al.*, 1997). As reservas de

N presentes na matéria orgânica do solo são limitadas, podendo ser esgotado rapidamente durante alguns cultivos. Do mesmo modo, a fixação não-biológica contribui apenas com pequenas quantidades de N. Os fertilizantes nitrogenados representam a forma assimilada com maior rapidez pelas plantas (CRISPINO *et al.*, 2001).

Lamond e Wesley (2001), mostrou que o pico da demanda de N na produção de soja ocorre durante o enchimento do legume, ou nos estádios R1 a R6, onde todos os fotoassimilados serão destinados para formação do grão. A demanda de N nesta fase é grande, e somente o N fixado pode não ser suficiente para supri-la. Em um outro estudo Thies, Singleton e Bohlool (1995) e Bender, Haegele e Below (2015), relataram que a demanda por nitrogênio vai aumentando conforme o avanço do ciclo, e a maior demanda por N é no estágio de R5, por isso sugerem que as aplicações com fertilizantes nitrogenados devem ser divididas em cinco aplicações (V2, V4, R1, R3 e R5).

Existem estudos com aplicação de N na cultura da soja em ambientes tropicais (MENDES *et al.*, 2008), mas com metodologias que não atendem a curva de necessidade do nitrogênio para a soja e que não foram conduzidos em ambientes com alto potencial produtivo, além de que possivelmente, outros fatores estavam limitando a produtividade potencial da soja. Outros estudos foram realizados em locais de clima temperado como em Nebraska, nos Estados Unidos e em Balcarce na Argentina (MENZA *et al.*, 2017), utilizando uma metodologia de aplicação de N até então não desenvolvida em regiões subtropicais. A metodologia utilizada por Menza *et al.* (2017), se baseou no parcelamento em cinco estágios de desenvolvimento da cultura da soja.

Dessa forma, é importante conhecer o comportamento da cultura da soja, em resposta ao aporte de nitrogênio para que se atinja produtividades maiores que  $7 \text{ Mg ha}^{-1}$ , onde a fixação biológica de nitrogênio e a mineralização da matéria orgânica do solo não seriam suficientes para alcançar o potencial produtivo.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Determinar se o N é um fator limitante para altas produtividades, com diferentes grupos de maturidade relativa e com aplicações parceladas de N para a cultura da soja em ambiente Subtropical no Brasil.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- a) determinar se o potencial produtivo da cultura da soja é limitado por N quando aplicado parceladamente;
- b) identificar qual o GMR tem melhor resposta em função do manejo com e sem aplicação de nitrogênio.
- c) determinar os teores de proteína e óleo nos grãos de soja e quais os locais que tiveram os maiores teores de proteína e óleo.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 IMPORTÂNCIA DA CULTURA DA SOJA

Brasil, Argentina e Paraguai, países subtropicais, possuem cerca de 57 milhões de hectares cultivados com soja (FAO, 2019). Os Estados Unidos são os maiores produtores mundiais de soja, porém, o Brasil possui importância significativa na oferta e na demanda da soja, sendo o segundo maior produtor e o maior exportador mundial, com uma produtividade de 3.3 Mg ha<sup>-1</sup> e uma produção de 115 milhões de toneladas (CONAB, 2019). Na safra 2018/2019, a produção de soja nos três estados da Região Sul (Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul) foi de 38 milhões de toneladas, ficando atrás somente da Região Centro-Oeste, e deste total, o Rio Grande do Sul foi responsável pela produção de 17,5 milhões de toneladas de soja (5,5% inferior à safra passada) (CONAB, 2019). A perspectiva é que na próxima safra o Brasil ocupe a primeira posição no ranking mundial de produção de soja (USDA, 2018).

Além da importância econômica que a soja representa para os países produtores, esta oleaginosa possui alto valor proteico, sendo utilizada para a alimentação humana e animal. Cerca de cinquenta e seis por cento da produção total de sementes oleaginosas é proveniente da soja (FAO, 2019).

#### 3.2 ECOFISIOLOGIA DA SOJA, GRUPO DE MATURIDADE RELATIVA E ÉPOCA DE SEMEADURA

Estratégias de manejo que visem produtividades potenciais devem sempre ser baseadas de acordo com o ciclo da cultura e o ambiente de produção. O clima apresenta grande influência no ciclo de desenvolvimento e na produtividade das culturas agrícolas. Portanto, é importante o entendimento das relações entre a cultura e o ambiente (BATTISTI, 2013).

A soja (*Glycine max* (L) Merr.) é uma planta de característica herbácea e anual, que tem seu crescimento e desenvolvimento influenciado pela temperatura, fotoperíodo e pelo tipo de cultivar utilizada. A temperatura do ar é um dos principais componentes que afetam o desenvolvimento vegetal (ALBERTO *et al.*, 2009). Não obstante, o fotoperíodo é um importante regulador do ciclo de desenvolvimento da cultura da soja, que é classificada como planta de dia curto.

A escala criada por Fehr e Caviness (1977) é a mais utilizada para avaliar as fases de desenvolvimento da cultura da soja. Essa classificação divide em duas fases: uma vegetativa (V) e uma reprodutiva (R). O estágio vegetativo é determinado pela contagem do número de

nós, que se inicia a partir da emissão dos cotilédones (estágio VC) e termina com o aparecimento até o aparecimento do último nó (Vn). Já o estágio reprodutivo começa com o aparecimento da primeira flor na haste principal (R1), florescimento pleno (R2), aparecimento do legume com 0.5 cm (ou ponto de canivete – R3), legume com 2 cm (R4), início do enchimento de grãos (R5), legume completamente cheio (R6), um legume maduro na haste principal (R7) e a maturidade fisiológica (R8).

Alliprandini *et al.* (2009) definiu o grupo de maturidade relativa (GMR), como a duração do ciclo de desenvolvimento da soja, desde a semeadura da soja até a maturidade fisiológica, em dias. O GMR de uma cultivar fornece a informação do ciclo, que é uma resposta ao fotoperíodo, temperatura do ar, práticas de manejo e adaptação das cultivares ao local de cultivo (ALLIPRANDINI *et al.*, 2009; ZANON *et al.*, 2016).

Ter informações consistentes e confiáveis a respeito da ecofisiologia da soja é fundamental, visto que para manejos visando altas produtividades as recomendações são precisas e é necessário fazer o “ajuste fino”, ou seja, adequar cultivares com alto potencial produtivo, aliando o GMR recomendado para o local de cultivo e semeadura na época preferencial.

### 3.3 POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE

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<sub>2</sub> atmosférico e características genéticas (EVANS, 1993; VAN ITTERSUM; RABBINGE, 1997).

Uma das formas de calcular o PP é através de modelos matemáticos que descrevem 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 através de dados de experimentos de campo e lavouras, sendo levado em consideração para esta estimativa o tercil superior das produtividades, ou seja, após a estimativa das produtividades são selecionadas aquelas que pertencem ao tercil superior das máximas produtividades obtidas (GRASSINI *et al.*, 2015; VAN ITTERSUM *et al.*, 2013).

### 3.4 CICLO DO N

O N é um elemento químico que compõe duas moléculas orgânicas extremamente importantes: os ácidos nucleicos e as proteínas (ROSA; MESSIAS; AMBROZINI, 2003). Não obstante, o N compõe o ATP (adenosina trifosfato), que é um nucleotídeo essencial para todos os organismos vivos, pois é fornecedor de energia para processos metabólicos.

Na atmosfera, o N existe como gás ( $N_2$  - cerca de 78%) e seu estoque é cerca de um milhão de vezes maior que o N total contido nos organismos vivos. Apesar de sua abundância na atmosfera, o N é o nutriente mais limitante ao crescimento das plantas. Isso ocorre porque o  $N_2$  não pode ser utilizado pela maioria dos organismos, em decorrência da ligação tripla entre os átomos de N ( $N\equiv N$ ), o que torna a molécula quase inerte (VIEIRA, 2017). O N utilizado pelas leguminosas, como é o caso da soja, é uma combinação com o hidrogênio na forma de amônia ( $NH_3$ ). A passagem de  $N_2$  para  $NH_3$  é chamada de fixação. Alguns processos fixadores de N ocorrem naturalmente na natureza, como por exemplo as faíscas elétricas e os relâmpagos que são conhecidos como processos físicos (ROSA; MESSIAS; AMBROZINI, 2003). Também existem as indústrias de fertilizantes que são responsáveis pela produção de fertilizantes nitrogenados na forma granular ou líquidos e que são conhecidos como fixadores industriais, obtendo-se uma alta taxa de fixação de N por esse meio.

As bactérias do gênero *Bradyrhizobium*, são responsáveis pela fixação de N nas leguminosas, principalmente na cultura da soja. Estes microrganismos estabelecem uma relação simbiótica com a planta, ou seja, elas recebem da planta nutrientes para sua sobrevivência e em troca realizam a fixação do N (CÂMARA, 2014). Este tipo de fixação é conhecido como fixação biológica de N (FBN). Baixa fertilidade e pH do solo, viabilidade dos rizóbios, excesso ou déficit hídrico, temperaturas elevadas, competição entre estirpes, entre outros fatores bióticos e abióticos podem tornar limitantes a eficiência máxima do processo de fixação de N pelos rizóbios (PURCELL *et al.*, 2004; SINCLAIR *et al.*, 2007).

Na cultura da soja, a pesquisa vem trabalhando com a hipótese de que somente a FBN não seria suficiente para atender a demanda da soja por N visando altas produtividades (MENZA *et al.*, 2017). Esse processo ocorre nos nódulos, e é realizado por espécies de bactérias que habitam o solo ou que são fornecidas via inoculante, capazes de fixar biologicamente o  $N_2$  e, posteriormente, provocar a sua redução até amônia ( $NH_3$ ), que será incorporada em aminoácidos, na rota final do metabolismo do N (HUNGRIA; CAMPO; MENDES, 2001).

### 3.5 FIXAÇÃO BIOLÓGICA DO N E USO DE N EM COBERTURA NA CULTURA DA SOJA

O N é o elemento requerido em maiores quantidades pela maioria das culturas, pois é constituinte de várias moléculas importantes para seu desenvolvimento como proteínas, ácidos nucleicos, alguns hormônios e clorofila (EPSTEIN, 1999). A demanda de N pela soja pode ser atendida pela mineralização da matéria orgânica, pela fixação simbiótica e pela adubação (BALBINOT JUNIOR *et al*, 2016). Porém, há divergências entre pesquisadores sobre o assunto, pois segundo Kumawat *et al* (2000), utilizando-se apenas da FBN, a soja é incapaz de se satisfazer pela demanda de N e assim, garantir altas produtividades. Deste modo, existe uma necessidade para o fornecimento de N a soja, para aumentar a sua produtividade (BHANGU; VIRK, 2019). Singh *et al* (2001) realizaram um ensaio de campo e relataram que o rendimento de óleo e proteína aumentaram com a aplicação de 60 kg N ha<sup>-1</sup>. No Brasil, a adubação nitrogenada na cultura da soja não é recomendada pela pesquisa, já que a fixação biológica do N, juntamente com o N disponibilizado pela matéria orgânica do solo, supre a demanda da cultura por esse nutriente, desde que a inoculação seja realizada seguindo as indicações técnicas (MENDES *et al.*, 2008). Contudo, segundo Woli *et al.* (2013), os efeitos da aplicação de N na cultura da soja sobre a produtividade ainda não estão completamente esclarecidos.

Com o sistema plantio direto consolidado em todo Brasil, e com os seguidos lançamentos de cultivares com teto elevado de produtividade, os resultados de pesquisa obtidos nos Estados Unidos (LAMOND; WESLEY, 2001; MENZA *et al.*, 2017; WESLEY *et al.*, 1998), com resposta da soja à aplicação de N, nos estágios iniciais da cultura, pré-florescimento e no início do enchimento de grãos, voltaram a gerar dúvidas sobre a necessidade de se adubar a soja brasileira com fertilizantes nitrogenados. Porém, devido ao elevado custo para aplicações de N na soja, este manejo não é economicamente viável.

Vargas, Peres e Suhel (1982) relataram que não há evidências de benefícios da adubação nitrogenada para a cultura da soja cultivada em solos de cerrados, com exceção nos casos em que não ocorra nodulação. Aratani *et al.* (2008) apontou que a adubação nitrogenada na cultura da soja, independente da época de aplicação, não proporciona aumento de produtividade em relação ao tratamento sem N. Porém, estes estudos foram realizados há muito tempo e basearam-se em grandes quantidades de N aplicado por hectare, utilizando-se de cultivares com características genéticas diferentes das utilizadas atualmente, de ciclo e de potencial produtivo diferentes das atuais, evidenciando que precisa ser realizado um novo estudo para responder: o nitrogênio está sendo fator limitante para altas produtividades?

Mesmo na presença de adequada inoculação, alguns autores como Hatfield *et al.* (1974) e Vasconcelos, Paiva e Fontana (1978) evidenciaram a importância do suprimento de N no solo para o crescimento inicial da soja. Outros estudos como o de Shibles (1998) relata que a capacidade de fixação simbiótica de N<sub>2</sub> começa a diminuir rapidamente após o estágio de crescimento R5, que corresponde ao estágio de maior demanda de síntese de proteínas.

Experimentos foram conduzidos pela Embrapa Soja de Londrina - PR, nas cidades de Londrina e Ponta Grossa – PR, onde cada experimento constou de seis tratamentos: 1) Controle não inoculado; 2) Controle não inoculado + 200 kg de N (100 kg de N no plantio e 100 kg no florescimento); 3) Inoculação padrão (IP) com as estirpes SEMIA 587 + SEMIA 5080, na dose de 500 g de 8 inoculante turfoso (10 células/g) / 50 kg de sementes; 4) IP + 30 kg de N no plantio; 5) IP + 50 kg de N no pré-florescimento; 6) IP + 50 kg de N no início do enchimento dos grãos. O N foi sempre fornecido na forma de ureia e à lanço. Em todos os experimentos conduzidos em Londrina e Ponta Grossa a aplicação de 100 kg de N ha<sup>-1</sup> na semeadura reduziu drasticamente a nodulação. Nessa época, mesmo a aplicação de uma dose de N considerada baixa, 30 kg de N, também reduziu a nodulação nos experimentos conduzidos e não resultou em incrementos significativos no rendimento da soja.

Lamond e Wesley (2001), também verificaram que nos Estados Unidos, os produtores têm alcançado produtividades de soja, com irrigação, rotineiramente acima de 4.000 kg ha<sup>-1</sup>. Uma cultura com 4.700 kg ha<sup>-1</sup> requer aproximadamente 280 kg N ha<sup>-1</sup> que são translocados para os grãos em desenvolvimento durante o enchimento dos legumes. Nestas condições de alta produtividade, o N suplementar tardio pode aumentar as produções. Segundo os mesmos autores e já referido na introdução as pesquisas no passado mostraram que o pico da demanda de N na produção de soja ocorre durante o enchimento dos legumes ou nos estádios R1 a R5. A demanda de N nesta fase é grande, e somente o N fixado pode não ser suficiente para supri-la. O N do solo e o fixado podem ser necessários para a máxima produção de soja, principalmente, sob condições para alta produtividade.

Na literatura internacional, estudos de campo sobre a adubação nitrogenada tardia da soja evidenciam tanto a ocorrência (GAN *et al.*, 2003; WESLEY *et al.*, 1998) quanto a ausência de ganhos de produtividade (KOUTROUBRAS; PAPAKOSTA; GAGIANAS, 1998; PAPACOSTA; VERESOGLOU, 1989; WOOD; TORBERT; WEAVER, 1993). Entretanto, os resultados obtidos em outros países não podem ser extrapolados para as condições brasileiras, tendo-se em vista que as interações entre o tipo de solo e os genótipos do macro e microsimbionte variam de acordo com cada local.

Por mais que a maioria das publicações científicas realizadas com comparação entre adubação nitrogenada e inoculação, não mostrarem diferença significativa quanto à produção de grãos, existem alguns trabalhos em que obtiveram resultados positivos com a adubação nitrogenada na soja, como Judy e Murdock (1998), Paek *et al.* (1998), Santos *et al.* (2000) e Soares Novo *et al.* (1999). Sendo assim, a obtenção ou não do efeito positivo da adubação nitrogenada em soja, pode estar na dependência de outros fatores, tais como, variedades, épocas de semeadura, fonte de N, etc....

Mendes *et al.* (2008) realizando experimentos com aplicação de N em Latossolos do Cerrado brasileiro, utilizando dos seguintes tratamentos: inoculação-padrão (IP) com as estirpes SEMIA 5079 (CPAC-15) e SEMIA 5080 (CPAC-7) à dose de 500 g de inoculante turfoso por 50 kg de sementes (106 células por semente); IP + 200 kg ha<sup>-1</sup> de N, na forma de ureia, divididos em uma aplicação de 100 kg ha<sup>-1</sup> de N na semeadura e outra de 100 kg ha<sup>-1</sup> no estágio R1 (início do florescimento); IP + 50 kg ha<sup>-1</sup> de N, na forma de nitrato de amônio, em R1; IP + 50 kg ha<sup>-1</sup> de N, na forma de sulfato de amônio, em R1; IP + 50 kg ha<sup>-1</sup> de N, na forma de nitrato de amônio, em R5 (enchimento de grãos); e IP + 50 kg ha<sup>-1</sup> de N, na forma de sulfato de amônio, em R5, concluiu que a utilização de fertilizantes nitrogenados em suplementação tardia para a soja ao se analisar a média dos rendimentos de grãos da soja, em cada uma das três áreas, observa-se que a aplicação de nitrato de amônio e sulfato de amônio, nas fases de pré-florescimento e enchimento de grãos, promoveu aumentos no rendimento da cultura, que variaram de 1 a 4,3 sacas ha<sup>-1</sup> de soja, em relação à inoculação de *Bradyrhizobium*, em Latossolos do Cerrado.

Balbinot Junior *et al.* (2016) estudando o efeito da aplicação de N mineral (sulfato de amônio – 21% de N), em três aplicações (semeadura, V2 e R5.2), a uma dose de 45 kg de N ha<sup>-1</sup>, não encontrou interação entre a densidade das plantas de soja e a aplicação de N mineral no rendimento, nos componentes do rendimento e nas concentrações de óleo e proteína nos grãos de soja. O GMR utilizado no trabalho era 5.9 e as populações de plantas trabalhadas foram 135, 235, 315 e 440 mil plantas ha<sup>-1</sup> e 105, 210, 345 e 430 mil plantas ha<sup>-1</sup>, nas safras agrícolas de 2013/2014 e 2014/2015, respectivamente.

Em um trabalho, recentemente publicado, os autores, Menza *et al.* (2017), evidenciaram que o N aplicado na cultura da soja promove o incremento da produtividade. No seu trabalho, que foi conduzido em Nebraska - EUA e em Balcarce - ARG foram avaliados vários ambientes com diferentes potenciais produtivos para avaliar o grau de limitação de N no rendimento e na qualidade dos grãos de soja. Um protocolo com aplicações sazonais de fertilizante nitrogenado foi desenvolvido para garantir uma condição de crescimento que não seria limitada por N. O

protocolo consistia em estimar o total de N requisitado pela cultura com base nos níveis de potencial produtivo simulados para o local. Assim, garantiram uma sincronização entre a demanda de N da cultura e a fenologia da soja, através do escalonamento das aplicações de fertilizantes em quantidades fracionárias em cinco etapas para corresponder ao padrão sazonal na dinâmica de captação de N da cultura. Foram aplicados 10% da dose em V2, 10% em V4, 20% em R1, 30% em R3 e 30% em R5.

Os resultados obtidos no trabalho de Menza *et al.* (2017) foram, em que, ambos os campos produtores de soja que tinham produtividades acima de 2.5 Mg ha<sup>-1</sup>, aumentaram a produtividade utilizando N em cobertura. Além da produtividade ter sido maior, onde teve-se aplicação de N, o teor de proteína e o teor de óleo nos grãos foram maiores, bem como o peso de grãos que também foi maior. A hipótese que eles propuseram era de que em locais com alto potencial produtivo o N é um fator limitante e que somente a FBN não seria suficiente para atender a demanda da soja por N. Esta hipótese ficou clara ao observar os dados conforme a Figura 2 que foi apresentada em seu trabalho. Convém salientar que neste trabalho as sementes de soja foram inoculadas, ou seja, a FBN nos ambientes com alto potencial produtivo, não foi eficiente para garantir altas produtividades. Então, surge a necessidade, mais uma vez, de se estudar aplicações de nitrogênio em cobertura na cultura da soja visando produtividades potenciais.

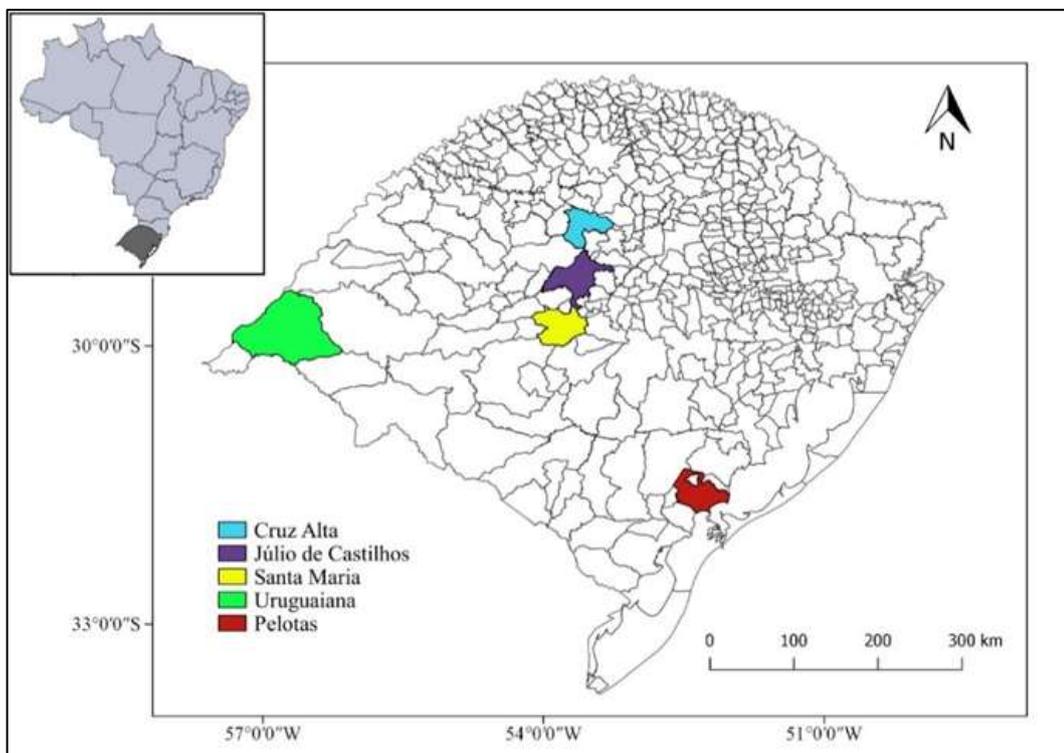
Somando-se a conclusão do trabalho acima citado, Teixeira *et al* (2018) discute em seu experimento que a cultura da soja apresenta diferentes percentuais de N oriundo da fixação biológica ao longo do seu ciclo de desenvolvimento, e mostrou picos de fixação nos estádios R1/2 e R5.5. Segundo Hardy e Havelk (1976), 90% do N são fixados durante os estádios reprodutivos da soja, no entanto nos estádios R3-4 foi observado o declínio da atividade da FBN. Albrecht *et al.* (2008), afirma que a maior sensibilidade do sistema de fixação biológica do N, é reflexo da elevação da temperatura do ar que, somada à radiação solar exacerbada no verão, aumentam a temperatura do solo, afetando os nódulos radiculares, coincidindo com a época de alta demanda de compostos nitrogenados, que é a da fase reprodutiva da cultura. Logo, neste trabalho foi garantido, através de uma metodologia de aplicação de N até então inédita em ambiente subtropical, que não faltou N nas fases mais críticas e de maior demanda de N pela cultura, além de uma boa condição de umidade no solo durante o cultivo.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 EXPERIMENTOS DE CAMPO

Os experimentos foram conduzidos nas safras agrícolas de 2017/2018 e 2018/2019, nos municípios de Cruz Alta, Júlio de Castilhos, Santa Maria, Uruguaiiana e Pelotas, no RS (Figura 1). Os locais e as áreas experimentais foram selecionadas por representar ambientes subtropicais, e que na média dos últimos 5 anos, as lavouras de soja, obtiveram produtividades superiores a 5 Mg ha<sup>-1</sup> (Tabela 1). Além disso, as lavouras de soja localizadas nos municípios de Júlio de Castilhos e Cruz Alta apresentam as maiores produções do Estado, com 400,3 mil toneladas e 335,2 mil toneladas respectivamente, sendo o 2º e 3º município do RS que mais produzem soja. A precipitação e dados de temperatura para cada local e mês de cultivo são informados na figura 2.

Figura 1 - Mapa do estado do Rio Grande do Sul (RS), Brasil. A localização dos locais experimentais está em cores sólidas no mapa, sendo azul: Cruz Alta; roxo: Júlio de Castilhos; amarelo: Santa Maria; verde: Uruguaiiana e vermelho: Pelotas. Inserção indica a localização do RS no Brasil



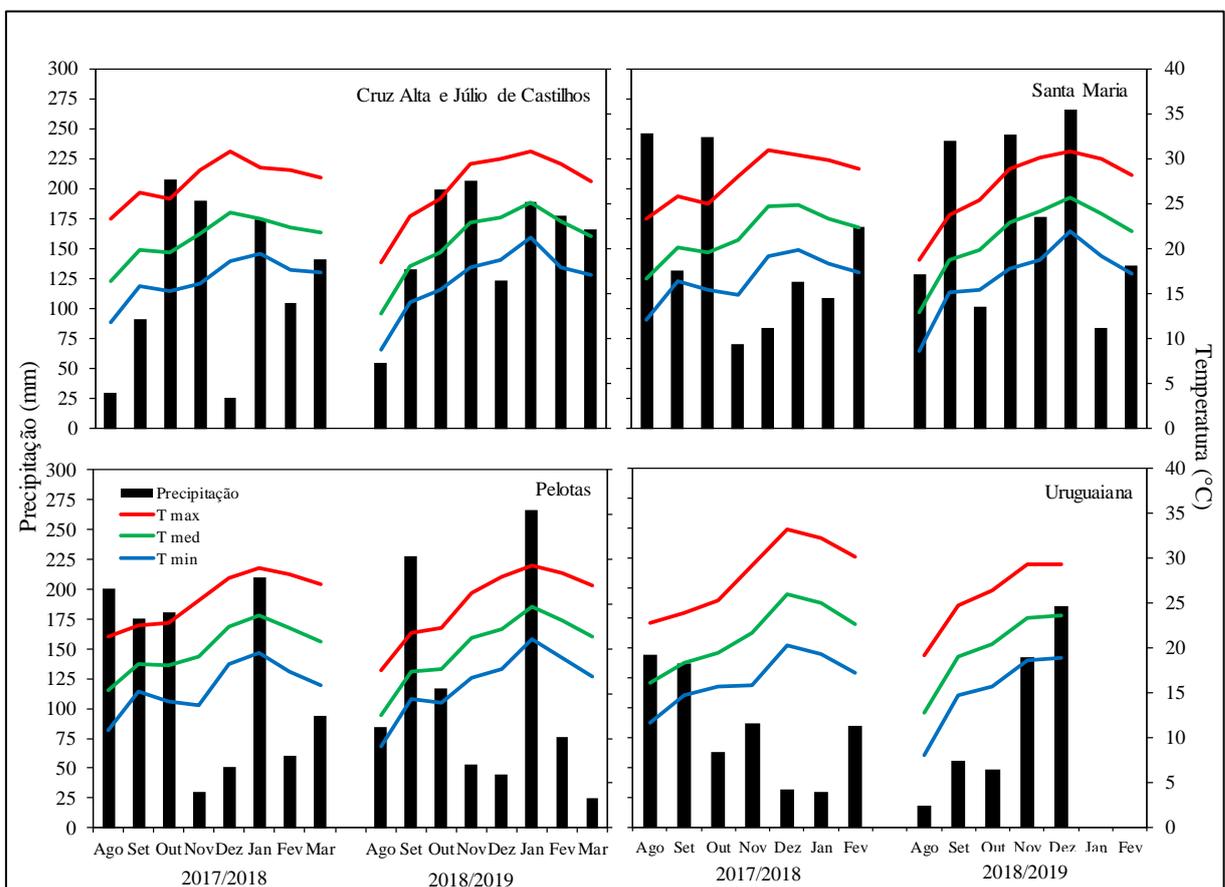
Fonte: Do autor (2019).

Tabela 1 - Experimentos com nitrogênio na cultura da soja, conduzidos durante dois anos agrícolas (2017/2018 e 2018/2019) em 5 locais do estado do Rio Grande do Sul – Brasil.

Local dos Experimentos	Coordenadas Geográficas	Safra	Grupo de Maturidade Relativa	Data de Semeadura	Tipo de Cultivo	Dose de N (Kg N ha <sup>-1</sup> )
<b>Fazendas</b>					Sistema Plantio	
Júlio de Castilhos	29°13'37"S / 53°40'57"W	2017/2018	5.0 e 5.5	30/10/2017	Direto (SPD)	632
Cruz Alta	28°38'19"S / 53°36'23"W	2017/2018	5.6	03/11/2017	SPD	632
Cruz Alta	28°38'19"S / 53°36'23"W	2018/2019	6.5	19/11/2018	SPD	640
Uruguaiana	29°45'17"S / 57°05'18"W	2018/2019	5.8	20/11/2018	SPD	640
<b>Instituição de Pesquisa</b>						
Santa Maria	29°43'29"S / 53°43'16"W	2018/2019	4.8; 5.9 e 6.8	10/08/2018	SPD	640
Pelotas	31°46'19"S / 52°20'33"W	2018/2019	6.2	06/12/2018	SPD	640

Fonte: Do autor (2019).

Figura 2 - Precipitação e temperatura (mínima, média e máxima) de todos os locais nas safras 2017-2018 e 2018-2019, referente aos meses de agosto até março.



Fonte: Do autor (2019).

## 4.2 CRUZ ALTA

Os experimentos em Cruz Alta foram conduzidos nas lavouras produtoras de soja da Sementes Aurora, localizadas próximo as margens BR-158 na Fazenda Santa Tereza. Na safra de 2017/2018 a semeadura ocorreu dia 03/11/2017, utilizando a cultivar BRASMAX Lança IPRO com GMR de 5.8 (Tabela 1). Já na safra 2018/2019, a semeadura ocorreu dia 19/11/2018, utilizando a cultivar BRASMAX Compacta IPRO, com GMR de 6.5. Cada experimento foi conduzido em um talhão diferente, sendo que o trigo era o cultivo que antecedeu a soja. Os solos eram profundos (1.50 metros) sem restrições físicas ou químicas para o crescimento das raízes. O espaçamento entre linhas foi de 0.45 m, utilizando 11 sementes  $m^{-2}$  em 2017/2018 e 12 sementes  $m^{-2}$  em 2018/2019. Em todos os casos, as sementes foram tratadas com fungicida e inseticida, além de serem inoculadas com estirpes de *Bradyrhizobium* a uma taxa de 100 mL para cada 50 kg de sementes, seguindo as recomendações para altas produtividades. Utilizou-se 300 kg  $ha^{-1}$  de adubação de base NPK, com formulação de 12-30-20 em 2017/2018. Enquanto que em 2018/2019 foram colocados 200 kg  $ha^{-1}$  de 07-40-00 e 200 kg  $ha^{-1}$  de cloreto de potássio na base. A área utilizada havia pivô central para as irrigações, porém, não se fez necessário irrigar a soja, pois os volumes de chuvas que ocorreram foram distribuídas nestas safras. Ambos experimentos estavam localizados em uma área com alta fertilidade, conforme os mapas de colheita e fertilidade indicavam. Com exceção da primeira aplicação para controle de plantas daninhas que foi realizada com pulverizador auto propelido, as demais aplicações foram aéreas com um avião agrícola. O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso com quatro repetições, também para a testemunha.

## 4.3 SANTA MARIA

O experimento foi conduzido na Área Experimental do Departamento de Fitotecnia da UFSM. A semeadura ocorreu dia 10/08/2018. Foram utilizados três cultivares: BRASMAX Raio IPRO, BRASMAX Delta IPRO e BRASMAX Ícone IPRO, com GMR de 5.0, 5.9 e 6.8, respectivamente. Além do GMR, trabalhou-se neste experimento com a densidade de plantas. Foram semeadas 3 densidades: 8, 14 e 20 plantas por metro, o qual representa uma população de 177, 311 e 444 mil plantas  $ha^{-1}$ , espaçadas a 0.45 m entre linhas. As sementes foram tratadas com fungicida, inseticidas e inoculadas com estirpes de *Bradyrhizobium* no momento da semeadura a uma taxa de 100 mL para cada 50 kg de sementes. A semeadura ocorreu

manualmente, com abertura de sulco e em seguida foi depositado a semente. Após o fechamento do sulco, a área foi adubada, a lanço, com adubo NPK de formulação 5-20-20, a uma dose de 500 Kg ha<sup>-1</sup>. A cultura que antecedia a soja foi a aveia preta. O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso com quatro repetições, também para a testemunha. A irrigação da área se deu por meio de gotejamento.

#### 4.4 JÚLIO DE CASTILHOS

O experimento foi conduzido na safra de 2017/2018, na Agropecuária Cechin, com a semeadura ocorrendo no dia 30/10/2017. Foram utilizadas duas cultivares: PIONNER 95R51 e BRASMAX Raio IPRO, com GMR de 5.5 e 5.0, respectivamente. Os experimentos foram conduzidos no mesmo talhão, sendo que o trigo era o cultivo que antecedeu a soja. Os solos eram profundos sem restrições físicas ou químicas para o crescimento das raízes até 1.0 m. O espaçamento entre linhas foi de 0.50 m, utilizando 11 sementes m<sup>-2</sup>. Em todos os casos. As sementes foram tratadas com fungicida e inseticida, além de serem inoculadas com estirpes de *Bradyrhizobium* a uma taxa de 100 mL para cada 50 kg de sementes, seguindo as recomendações para altas produtividades. Utilizou-se adubação de base NPK, com formulação de 04-30-20 com dose de 300 kg ha<sup>-1</sup> e mais 120 kg ha<sup>-1</sup> de 00-00-60 a lanço. A área experimental tinha irrigação por pivô central, porém como os volumes de chuva foram bem distribuídos, não foi necessário a irrigação. A área experimental estava localizada em um local alta fertilidade, conforme os mapas de colheita e fertilidade indicavam. Os experimentos estavam dispostos em quatro blocos casualizados.

#### 4.5 PELOTAS

O experimento foi conduzido na safra de 2018/2019, na Área Experimental do Departamento de Solos da Universidade Federal de Pelotas (UFPEL), com a semeadura ocorrendo no dia 06/12/2018. Foi utilizada a cultivar BSIRGA 1642 IPRO, com GMR de 6.4, O cultivo antecessor havia sido a aveia. O espaçamento entre linhas foi de 0.45 m, utilizando 11 sementes por metro. As sementes foram tratadas com fungicida e inseticida, além de serem inoculadas com estirpes de *Bradyrhizobium* a uma taxa de 100 mL para cada 50 kg de sementes, seguindo as recomendações para altas produtividades. A área experimental estava localizada em um local com alta fertilidade. Os experimentos estavam dispostos em quatro blocos casualizados.

#### 4.6 URUGUAIANA

O experimento foi conduzido na safra de 2018/2019, na Fazenda do Touro Passo, que é uma lavoura comercial de soja do Grupo Ceolin. A semeadura ocorreu no dia 20/11/2018. Foi utilizada a cultivar DM 53i58 RSF IPRO, com GMR de 5.8. A área estava sobre pousio, pois o cultivo de verão anterior havia sido o arroz irrigado. O solo em questão é preferencialmente utilizado para cultivo de arroz irrigado, porém, muitos produtores estão implementando a soja em várzea, para rotacionar com o arroz irrigado a fim de controlar as plantas daninhas no cultivo de arroz irrigado. Para as características de altas produtividades, o talhão onde o experimento foi conduzido, se encaixava, não havendo limitação para o crescimento e desenvolvimento da soja. O espaçamento entre linhas foi de 0.45 m, utilizando 11 sementes m<sup>-2</sup>. As sementes foram tratadas com fungicida e inseticida, além de serem inoculadas com estirpes de *Bradyrhizobium* a uma taxa de 100 mL para cada 50 kg de sementes, seguindo as recomendações para altas produtividades. A área experimental estava localizada em um local alta fertilidade e a irrigação era por superfície. Os experimentos estavam dispostos em quatro blocos casualizados, com quatro repetições.

Tabela 2 – Atributos químico de análises de solo extraídos de camadas de 0 – 20 cm de solo dos experimentos conduzidos nas safras de 2017-2018 e 2018-2019.

	Júlio de Castilhos		Cruz Alta		Santa Maria	Pelotas	Uruguaiana
	2017/2018	2017/2018	2018/2019	2018/2019	2018/2019	2018/2019	2018/2019
<b>Tipo de Solo</b>	Argissolo Vermelho	Latossolo Vermelho	Latossolo Vermelho	Argissolo Bruno	Planossolo Háptico	Chernossolo Ebânico	
<b>Argila (%)</b>	33	50	50	26	18	-	
<b>Matéria Orgânica (%)</b>	2.8	3.0	3.0	2.6	0.97	-	
<b>Ca cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup></b>	6.6	50%*	35%*	5.6	1.1	-	
<b>Mg cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup></b>	2.1	20%*	12%*	2.6	1.4	-	
<b>S mg/dm<sup>3</sup></b>	9.4	10ppm	12ppm	2.8	8.7	-	
<b>P-Mehlich mg/dm<sup>3</sup></b>	22.4	24.0	11	6.9	8.6	-	
<b>K mg/dm<sup>3</sup></b>	152.0	130.0	3%*	174.0	38.0	-	
<b>Cu mg/dm<sup>3</sup></b>	1.6	2ppm	5ppm	1.3	0.5	-	
<b>Zn mg/dm<sup>3</sup></b>	1.0	2ppm	2ppm	1.2	0.3	-	

\*Dasos com base em mapas de fertilidade. Uruguaiana não foi possível obter análise de solo.

Fonte: Do autor (2019).

#### 4.7 PROTOCOLO DE APLICAÇÃO DE N

Os experimentos consistiram em dois tratamentos: com aplicação de N e sem aplicação de N, conduzidos sob o mesmo manejo e condições. O tratamento em que foi aplicado N tinha

como objetivo garantir que o N não fosse um fator limitante ao longo do ciclo de cultivo. Enquanto que o tratamento sem aplicação de N, tinha como objetivo que a cultura extraísse do solo e através da FBN o N necessário para seu ciclo de desenvolvimento. O protocolo de aplicação de N está seguindo a escala de absorção de N da soja (BENDER; HAEGELE; BELOW, 2015; MENZA *et al.*, 2017; THIES; SINGLETON; BOHLOOL, 1995), a fim de garantir plenamente os requisitos de N pela cultura da soja, e proteger o potencial de produtividade do local. As aplicações de nitrogênio foram divididas em cinco estágios: V2, V4, R1, R3 e R5, representando 10%, 10%, 20%, 30% e 30% da dose total aplicada, respectivamente. Sabendo-se que para produzir 1 Mg de grãos de soja necessita-se de 80 kg de N (HUNGRIA; CAMPO; MENDES, 2001), colocou-se como objetivo a produção de 8 Mg ha<sup>-1</sup>. Assim, as doses aplicadas foram calculadas visando produtividades de 8 Mg ha<sup>-1</sup>.

O N fornecido foi na forma de ureia (45% de N) e as quantidades de N aplicadas em cada experimento foram diferentes. Nos experimentos de 2017/2018 em Júlio de Castilhos (30/10/2017) e Cruz Alta (03/11/2017), as aplicações de N foram nos estágios reprodutivos de R1, R3 e R5. Isto deve-se ao fato de que as lavouras de soja se encontraram em estágio avançado de V4, impossibilitando as aplicações de V2 e V4. Portanto, optou-se por realizar somente as aplicações nos estágios reprodutivos. A dose de N aplicado por hectare foi de 632 kg. As doses foram divididas em três aplicações: 30% em R1, 40% em R3 e 30% em R5. Quando iniciou a safra 2018/2019 foram instalados experimentos em Santa Maria (10/08/2018), Cruz Alta (19/11/2018), Uruguaiana (20/11/2018) e Pelotas (06/12/2018) e em todos estes locais as doses foram de 640 kg de N por hectare, sendo divididas em cinco aplicações: 10% em V2; 10% em V4; 20% em R1; 30% em R3 e 30% em R5. Como escrito nos objetivos, temos como foco em determinar se o nitrogênio é um fator limitante para altas produtividades da cultura da soja em ambiente Subtropical no Brasil, e por isso, ressaltamos que as aplicações aqui realizadas são economicamente e ambientalmente inviáveis, não se sustentando em um sistema de produção de soja.

As aplicações sempre se deram em condições ideais de umidade ou foram seguidas de uma irrigação. Mas, foram acrescidos mais 20% de N em cima da dose, para compensar as perdas por lixiviação e volatilização, possibilitando garantir assim a dose ideal a ser fornecida. Foi estabelecido o seguinte critério para as aplicações de ureia: 50% ou mais das plantas da parcela estivessem no estágio indicado para aplicar (V2, V4, R1, R3 e R5). As aplicações foram realizadas manualmente, a lanço, utilizando um recipiente plástico, previamente pesado, contendo a medida a ser preenchida com ureia.

#### 4.8 AVALIAÇÕES

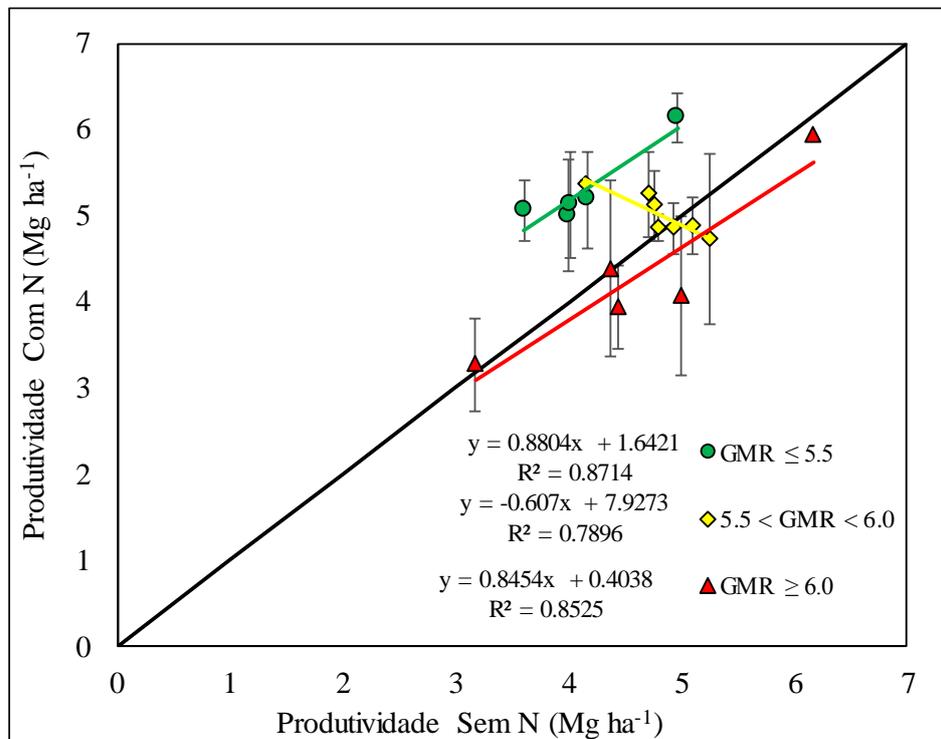
Durante o ciclo da soja, o crescimento e desenvolvimento foi acompanhada e avaliada através da escala fenológica de Fehr e Caviness (1977). Para estimar a produtividade foram colhidos 5 m<sup>2</sup> de área quando as plantas atingiram o estágio de R8. Para determinar a produtividade, os grãos foram secados em estufa, pesados e após corrigido o valor para 13% de umidade. Após isso, uma parte das amostras de soja foram moídas em moedor para que se tornasse possível a determinação dos teores de proteína e óleo.

Para a determinação da umidade foi utilizado o método de secagem em estufa (105 °C ± 5°C), baseado na remoção da água por aquecimento, até obtenção de peso constante (AOAC, 2006). A determinação de proteínas foi realizada pelo método de micro-Kjeldahl no qual avaliou-se o teor de N total e se utilizou o fator de conversão 6,25 para transformação em proteína bruta (AOAC, 2006). O teor de óleo foi determinado pelo método de Bligh-Dyer (BLIGH; DYER, 1959). Todas as análises foram realizadas em triplicata e os resultados expressos em base seca. As produtividades de proteína e de óleo (Mg ha<sup>-1</sup>) foram calculados multiplicando-se a produtividade da soja pelo valor das amostras de proteína e de óleo.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As produtividades variaram de 3.3 a 6.1 Mg ha<sup>-1</sup> nos experimentos em que se aplicou o fertilizante nitrogenado (Figura 3). Em um primeiro momento esperávamos encontrar aumento de produtividades com a aplicação de N, para todas cultivares, porém, ao refinarmos os dados, encontramos as maiores produtividades em cultivares de ciclo curto, GMR baixo (GMR ≤ 5.5), seguida das cultivares com ciclo intermediárias (5.5 < GMR < 6.0). É encontrado um valor limite de produtividade de 4.5 Mg ha<sup>-1</sup>, para definir ambiente de altas produtividades de soja (SALVAGIOTTI *et al.*, 2008). A maioria dos experimentos conduzidos obtiveram produtividades maiores que 4.5 Mg ha<sup>-1</sup>. No experimento de Júlio de Castilhos, 2017/2018, com a cultivar de GMR 5.5 e no experimento de Cruz Alta, 2017/2018, com a cultivar de GMR 5.8, foram encontradas as maiores diferenças de produtividades nos tratamentos com N e sem N, sendo de 1.44 e 1.23 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

Figura 3- Produtividade de soja nos tratamentos com N e N. Cada ponto, representa o rendimento médio de um determinado ano × data de semeadura × GMR. A linha diagonal sólida indica  $y = x$ . Parâmetros da regressão linear ajustada (linha sólida verde – amarela – vermelha) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) também são mostrados



Fonte: Do autor (2019).

Os resultados obtidos indicam efeito positivo para o aumento da produtividade quando aplicado N em cultivares com GMR baixo, ou seja,  $GMR \leq 5.5$ , sendo representados na Figura 3 pelos círculos sólidos de cor verde. Estas cultivares, tiveram um ciclo de até 125 dias, por isso são consideradas de ciclo precoce. Isso pode explicar o porquê tiveram melhores resultados, visto que tiveram o N prontamente absorvível. Ao observarmos os componentes de rendimento deste grupo, notou-se que o peso de mil grãos, foi o componente de rendimento primário que mais sofreu alteração, tendo seus grãos com maior massa no tratamento com doses de N. O número de grãos por  $m^2$ , também foram maiores nos tratamentos com doses de N. Estes resultados também foram encontrados no trabalho desenvolvido por Menza *et al.* (2017), o qual afirma que na média de todos os ambientes, o tratamento com N resultou em mais grãos produzido por unidade de área colhida e também resultou em maior massa por semente. Bem como Bahry *et al.* (2014) encontrou que a aplicação de nitrogênio na fase reprodutiva da soja influenciou aumentando alguns componentes de rendimento, como o número de grãos por legumes e a massa de mil grãos.

No experimento conduzido em Santa Maria, usou-se três cultivares, cada uma representando um GMR (5.0; 5.9 e 6.8) e além disso, utilizou-se três densidades de semeadura, com 8, 14 e 20 plantas por metro linear (177, 311 e 444 mil plantas  $ha^{-1}$ ). Os resultados indicam que a densidade de plantas não influenciou nas produtividades. Balbinot Junior *et al.* (2016) no seu trabalho desenvolvido com aplicação de N mineral não encontrou interação com a densidade de plantas de soja na produtividade e nos componentes de rendimento. Assim, confirmou-se a nossa hipótese de que cultivares com GMR baixos possuem maior resposta a produtividade que os demais GMRs.

A cultivares de ciclo intermediário, com GMR variando de 5.5 a 6.0 tiveram produtividades acima e abaixo da linha 1:1 (Figura 3 - pontos sólidos em amarelo), ou seja, não houve ganhos expressivos de produtividade com estes materiais utilizado quando aplicado o N. Os experimentos que tiveram aumento de produtividade com o tratamento com N, foram em Cruz Alta 2017/2018 – não irrigado (GMR 5.6), o experimento irrigado do mesmo ano, e em Uruguaiana em 2018/2019 (GMR 5.8). O experimento de Uruguaiana 2018/2019 – não irrigado obteve o mesmo rendimento com e sem N. Ao passo que, no experimento de Santa Maria 2018/2019 com a cultivar de GMR 5.9 e com três densidades de semeadura não se encontrou resposta positiva ao aplicarmos N. A maior produtividade foi encontrada no tratamento com densidade de 20 plantas por metro, onde no tratamento com N produziu  $5.2 \text{ Mg } ha^{-1}$  e no tratamento sem N produziu  $4.9 \text{ Mg } ha^{-1}$ .

Cultivares com  $GMR \geq 6.0$ , possuem ciclo de mais de 135 dias, diferente dos demais GMRs estudados possuem menos dias de ciclo. Isso confere, a esse grupo de cultivares, maior tempo disponível para que as raízes e as bactérias fixadoras de N retirem o N necessário, para seu crescimento e desenvolvimento, da atmosfera e o N disponível do solo. Os experimentos, com cultivares com  $GMR \geq 6.0$ , foram conduzidos em Pelotas (GMR 6.4), Cruz Alta (GMR 6.5) e Santa Maria (GMR 6.8 – e três densidades de semeadura). O experimento em que se teve aumento de produtividade com aplicação de N foi em Pelotas, produzindo  $3.3 \text{ Mg ha}^{-1}$ , mesmo assim com uma produtividade inferior a aquela referência de  $4.5 \text{ Mg ha}^{-1}$ , que é o valor mínimo considerado para altas produtividades. Em Santa Maria a produtividade foi igual no tratamento com densidade de 20 plantas por metro ( $444 \text{ mil plantas ha}^{-1}$ ). Enquanto que nas outras densidades a produtividade foi maior nos tratamentos sem N. Porém, sabe-se que a época de semeadura realizada em Santa Maria, não é adequada para o uso destes materiais de ciclo longo, logo, mais estudos são necessários com esta categoria de cultivares e em datas de semeadura recomendadas. O experimento de Cruz Alta 2018/2019 foi utilizado uma cultivar de GMR 6.5, semeada em 19/11/2018, e a produtividade foi menor no tratamento com N em relação ao sem N.

Os resultados obtidos desafiam a afirmativa de que somente a fixação biológica de nitrogênio (FBN) é suficiente para garantir altas produtividades. Além disso, se reafirma a ideia de que cultivares com  $GMR \leq 5.5$ , tendem a responder mais que cultivares com  $GMR > 5.5$ . Para isso, novos estudos com mais repetições de anos e locais são necessários, pois, como se sabe, a FBN tem sua eficiência reduzida a partir de R3 (HARDY; HAVELK, 1976), estágio em que a planta irá concentrar toda sua energia para a formação dos legumes e posterior enchimento dos grãos (R5). A redução da atividade das bactérias fixadoras é compreendida pelo gasto energético da planta em fornecer nutrientes para a manutenção das bactérias, possibilitando a concentração de energias somente para o enchimento dos grãos.

Este trabalho se diferencia dos demais já realizados no Brasil, especialmente na Região Subtropical, pois fornece à soja todo N necessário durante seu ciclo. Por isso as aplicações foram divididas em cinco, com o tempo e a quantidade de cada divisão ajustado para corresponder à exigência ótima da cultura (em V2, V4, R1, R3 e R5), em quantidades crescentes (10%, 10%, 20%, 30%, e 30%, respectivamente) para simular o padrão sazonal de acumulação N em soja (BENDER; HAEGELE; BELOW, 2015; MENZA *et al.*, 2017; THIES; SINGLETON; BOHLOOL, 1995). Assim, se garantiu o fornecimento de N, necessário a cultura para que atinja valores próximo ao PP. Além disso, este trabalho contou com uma ampla faixa de GMR, representando a grande parte dos GMRs cultivados em ambiente Subtropical.

Kumawat, Dhakar e Maliwal (2000) afirmou que o conteúdo de proteína aumenta quando se aplicasse N, considerando que o teor em óleo diminuiu com o aumento do nível de proteína. Notavelmente, onde foi aplicado N, a cultura manteve a mesma concentração de proteína nos grãos (Figura 3a), e exibiu rendimentos de proteína mais elevados (Figura 3c), especialmente onde as produtividades também foram maiores. No banco de dados coletados não se encontrou resposta do teor de proteínas nas diferentes densidades populacionais estudadas. Sendo confirmado também, por Balbinot Junior *et al.* (2016) que não encontrou interação entre a densidade das plantas de soja e a aplicação de N mineral nas concentrações de óleo e proteína nos grãos de soja.

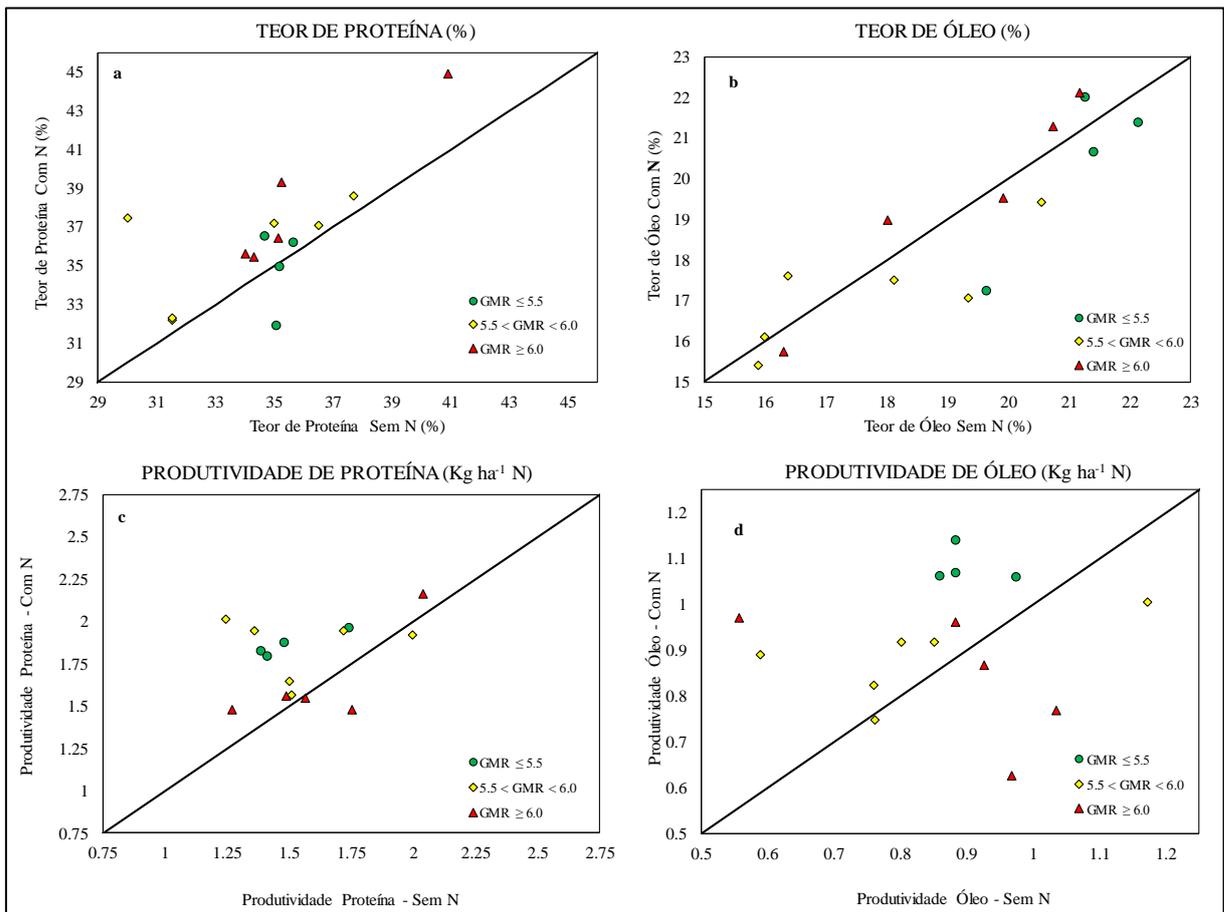
Em média, todos experimentos mantiveram ou aumentaram o teor de proteína nos grãos. Menza *et al.* (2017) encontrou que a concentração de proteína na semente foi aumentada pela fertilização nitrogenada. O maior valor do teor de proteína (44.92%) foi observado no experimento de Pelotas (GMR 6.4) (Figura 4a) e o menor valor (31.9%) foi encontrado no experimento de Júlio de Castilhos – 2017/2018 com a cultivar de GMR 5.0. A maioria das cultivares de soja apresentou um teor médio entre aproximadamente 30% e 45% de proteína. Também notamos que, as maiores concentrações de proteína estão nas cultivares que tiveram um maior ciclo de cultivo, surgindo a hipótese de que este grupo de cultivares possuem maior tempo para converter o N presente nos tecidos da planta em proteína nos grãos. Para isso, são necessários novos estudos que continuem com essa metodologia. Além da questão genética que governa a concentração de proteína nos grãos, os fatores ambientais também merecem atenção, como a disponibilidade de N e de umidade do solo. O N é acumulado durante o ciclo da soja e é utilizado na fase reprodutiva, especificamente no período de enchimento de grãos. Portanto, as condições climáticas durante o cultivo da soja interferem na concentração de proteína nos grãos (ALBRECHT *et al.*, 2008), necessitando assim que a cultura não sofra por estiagem e que seja fornecido o N nesse período.

O teor óleo (%) (Figura 4b) não foi influenciado pelas aplicações de N. Nos experimentos em que se observou um aumento do teor de proteína, houve uma diminuição do teor de óleo. O óleo presente nos grãos de soja em teores adequados (20%), fornece as calorias necessárias ao organismo, permitindo que as proteínas ingeridas da dieta sejam metabolizadas para síntese de novos tecidos, ao invés de serem destinadas à produção de energia, o que é comum nas dietas de baixo conteúdo calórico (CARRÃO-PANIZZI; MANDARINO, 1998).

As produtividades de proteína (Figura 4c) e de óleo (Figura 4d) são calculadas pela multiplicação da produtividade pelo teor de proteína e óleo de cada experimento. Em tempos futuros, há projeções que existirão mercados específicos para a produção de grãos de soja com

altos teores de proteína. Atualmente, os beneficiadores de grãos de soja, que compram soja, não estão interessados em rendimentos de proteína ou óleo. Em vez disso, seu principal interesse são as porcentagens de proteína e óleo nos grãos, e eles comprarão soja de maneira seletiva a partir de locais com percentuais de proteína e/ou óleo acima da média (MENZA *et al.*, 2017). A proteína da soja é a única do reino vegetal com possibilidade de substituir as proteínas animais, do ponto de vista nutricional, pois contém todos os aminoácidos essenciais (CANTO; TURATTI, 1989).

Figura 4 - Teor de proteína (a), teor de óleo (b), produtividade de proteína (c) e produtividade de óleo (d). Eixo X sem aplicação de N e eixo Y com aplicação de N. Linha diagonal sólida representa  $Y=X$ . Cada ponto de dado representa a média de um experimento

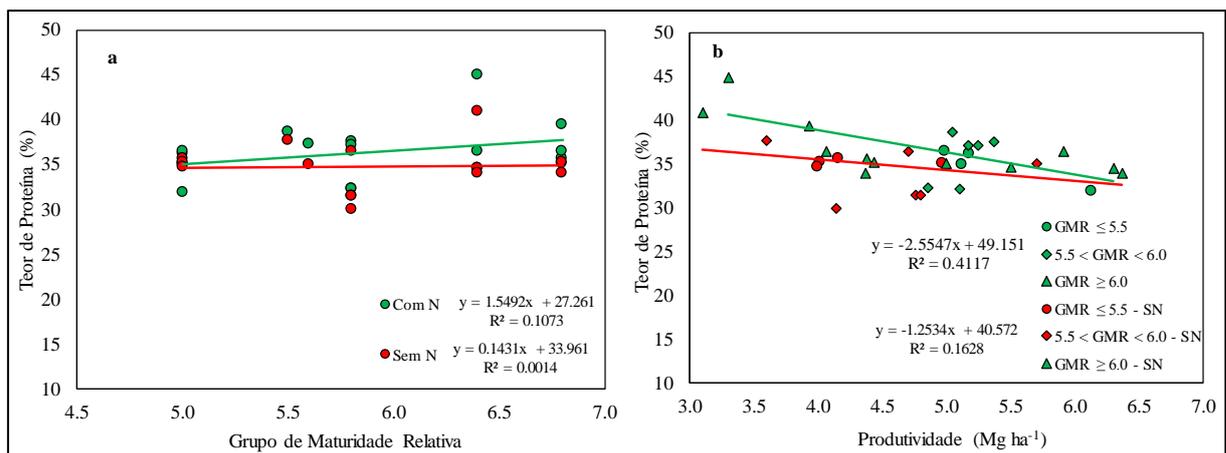


Fonte: Do autor (2019).

Analisando os experimentos (Figura 5b), encontramos que locais como Cruz Alta 2018/2019 (GMR 6.4) e Júlio de Castilhos 2017/2018 (GMR 5.0), onde tiveram as maiores produtividades nos tratamentos com N (6.31 e 6.14 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente), foram também

alguns dos locais que tiveram os menores valores do teor de proteína (34.5 e 31.9%, respectivamente). Ao passo que nos experimentos de Pelotas (GMR 6.2) e Santa Maria (GMR 6.8 – 8 plantas m<sup>-1</sup>), onde tiveram as menores produtividades nos tratamentos com N (3.30 e 3.93 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente), foram encontrados os maiores valores de proteína 44.92 e 39.35%, respectivamente. Isso pode ser claramente observado nas Figuras 5a e 5b onde nota-se um efeito de diluição. Nossa observação, foi ao encontro do que Albrecht *et al.* (2008) evidenciou no seu estudo, mostrando correlação negativa entre proteína e produtividade, no qual, as produtividades decresceram linearmente, enquanto os teores de proteína cresceram linearmente, para todas as cultivares estudadas. Também é possível notar, na Figura 4a, no tratamento com N, que quanto maior o GMR do cultivar maior foi a porcentagem de proteína encontrado. Para o tratamento sem N, os teores de proteína foram levemente maiores ou se mantiveram no seu patamar.

Figura 5 - Figura da esquerda (a) é apresentado no eixo X o grupo de maturidade relativa (GMR) e no eixo Y o teor de proteína (%). Na figura da direita (b) o eixo X é a produtividade dos experimentos e no eixo Y é o teor de proteína (%). Cada ponto representa a média de um experimento. As linhas sólidas (verde – tratamento com N e vermelha – tratamento sem N) são as linhas de regressão para cada conjunto de dados e o R<sup>2</sup> é mostrado



Fonte: Do autor (2019).

## 6 CONCLUSÃO

No presente estudo, o N não foi um fator limitante para a produtividade potencial da soja. O protocolo foi implementado com vários GMRs que representam em sua maioria, as mais utilizadas no estado do Rio Grande do Sul. Observou-se que os rendimentos da soja foram maiores nos tratamentos com N em cultivares com GMR baixo ( $GMR \leq 5.5$ ), e que para os GMR entre 5.5 e 6 e  $GMR \geq 6.0$  o incremento de produtividade é pequeno ou não houve. Além das produtividades, obteve-se resultados nos teores de proteínas e óleo nos grãos. A produtividade de proteína também foi maior nos tratamentos com N, exceto em três locais. O teor de proteína é maior (em %) nas cultivares com GMR maiores. Também observou-se, que as maiores porcentagens de proteínas foram encontradas nos experimentos com menor produtividade.

Este estudo fornece uma estrutura para avaliar as limitações de nitrogênio na soja com diferentes grupos de maturidade relativa e, possivelmente, em outras leguminosas, além de, explorar oportunidades de ajustar o atual manejo de N nos sistemas de cultivo de soja com alta produtividade. Visto que, para condições subtropicais a adubação nitrogenada, não é uma prática recomendada. Então, é necessário proporcionar que a cultura da soja seja cultivada em solos com altos teores matéria orgânica, manter um cultivo de inverno, boas práticas de inoculação e com estirpes mais eficientes. Sistemas de manejo do solo, como a rotação de culturas e a manutenção de plantas de cobertura na superfície, que resultam em maior infiltração de água, maior ciclagem de nutrientes e diminuição da temperatura no solo, podem constituir-se em práticas complementares para garantir melhores condições de nodulação e fixação de nitrogênio.

Também ressalta-se que este estudo não teve como objetivo avaliar aspectos econômicos destas aplicações. Tem-se claro que as doses aplicadas são economicamente e ambientalmente inviáveis, porém o foco do trabalho foi avaliar a resposta da produtividade e esta pergunta foi claramente respondida. Tampouco, tem-se como objetivo recomendar qualquer tipo de aplicação de nitrogênio em cobertura na cultura da soja.

## REFERÊNCIAS

- ALBERTO, C. M. *et al.* Modelagem do desenvolvimento de trigo considerando diferentes temperaturas cardinais e métodos de cálculo da função de resposta à temperatura. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, n. 6, p. 545-553, 2009.
- ALBRECHT, L. P. *et al.* Teores de óleo, proteínas e produtividade de soja em função da antecipação da semeadura na região oeste do Paraná. **Bragantia**, Campinas, v. 67, n. 4, p. 865-873, 2008.
- ALLIPRANDINI, L. F. *et al.* Understanding soybean maturity groups in Brazil: environment, cultivar classification and stability. **Crop Science**, v. 49, p. 801-808, 2009.
- ARATANI, R. G. *et al.* Adubação nitrogenada em soja na implantação do sistema plantio direto. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 24, n. 3, p. 31-38, 2008.
- ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS (AOAC). **Official methods as analysis of the association of official analytical chemists**. 18 ed. Washington: AOAC, 2006.
- BAHRY, C. A. *et al.* Efeito do nitrogênio suplementar sobre os componentes de rendimento da soja em condição de estresse hídrico. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 61, n. 2, p. 288-292, 2014.
- BALBINOT JUNIOR, A. A. *et al.* Desempenho agrônomo da soja em diferentes densidades de plantas e épocas de aplicação de nitrogênio em sistema de plantio direto. **Revista de Ciências Agrárias**, Belém, v. 59, n. 2, p. 132-137, 2016.
- BATTISTI, R. **Épocas de semeadura da cultura da soja com base no risco climático e na rentabilidade líquida para as principais regiões produtoras do Brasil**. 2013. 263f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 2013.
- BENDER, R. R.; HAEGELE, J. W.; BELOW, F. E. Nutrient uptake, partitioning: and remobilization in modern soybean varieties. **Agronomy Journal**, Madison, v. 107, n. 2, p. 563-573, 2015.
- BHANGU, R.; VIRK, H. K. Nitrogen management in soybean: a review. **Agricultural Reviews**, [S. l.], v. 40, n. 2, p. 129-135, 2019.
- BLIGH, E. G.; DYER, W. J. A rapid method of total lipid extraction and purification. **Canadian Journal of Biochemistry and Physiology**, [S. l.], v. 8, n. 37, p. 911-917, 1959.
- CÂMARA, G. M. S. Fixação biológica de nitrogênio em soja. **Informações Agrônomicas**, Piracicaba, v. 147, p. 1-9, 2014.
- CANTO, W. L. do; TURATTI, J. M. Produção e mercado de produtos intermediários protéicos de soja no Brasil. **Boletim do Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos**, Curitiba, v. 7, n. 2, p. 111-139, 1989.

CARRÃO-PANIZZI, M. C.; MANDARINO, J. M. G. **Soja**: potencial de uso na dieta brasileira. Londrina: EMBRAPA-CNPSO, 1998. 16p. (EMBRAPA-CNPSO. Documentos, 113).

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira de grãos (safra 2018/19)**: décimo primeiro levantamento | fevereiro 2018. Brasília: Conab, 2019.

CRISPINO, C. C. *et al.* **Adubação nitrogenada na cultura da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2001. 6p. (Comunicado Técnico n° 75). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/460181/1/comTec075.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2018.

EPSTEIN, E. Plants and inorganic nutrients. *In*: Hopkins, W. G. **Introduction to plant physiology**. 2. ed. New York: John Wiley, 1999. p. 61-67.

EVANS, L. T. **Crop evolution, adaptation, and yield**. Cambridge: Cambridge University Press, 1993. 514p.

FEHR, W. R.; CAVINESS, C. E. **Stages of soybean development**. Ames: Iowa State University of Science and Technology, 1977. 15p. (Special Report, 80).

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **FAOSTAT Database – Produção agrícola**. 2019. Disponível em: <http://faostat.fao.org/>. Acesso em: 20 nov. 2019.

GAN, Y. *et al.* Effect of N fertilizer top-dressing at various reproductive stages on growth, N<sub>2</sub> fixation and yield of three soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) genotypes. **Field Crops Research**, [S. l.], v. 80, n. 2, p. 147-155, 2003.

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, 2015.

HARDY, R. W. F.; HAVELK, U. D. Photosynthate as a major factor limiting nitrogen fixation by field-grown legumes with emphasis on soybeans. *In*: NUTMAN, P. S. (Eds.). **Symbiotic nitrogen fixation in plants**. Cambridge: Cambridge University, 1976. p. 21-349.

HATFIELD, J. L. *et al.* Effect of applied nitrogen on the nodulation and early growth of soybeans (*Glycine max* (L) MERR.). **Agronomy Journal**, Madison, v. 66, n. 1, p. 112-114, 1974.

HUNGRIA, M.; CAMPO, R. J.; MENDES, I. C. **Fixação biológica do nitrogênio na cultura da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2001. 48p. (Circular Técnica n° 35). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/459673/1/circTec35.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2018.

HUNGRIA, M. *et al.* **Adubação nitrogenada na soja?**. Londrina: Embrapa Soja, 1997. 4p. (Comunicado Técnico n° 57). Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/53933/1/57.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2018.

- JUDY, C.; MURDOCK, L. Late season supplemental nitrogen on double-cropped soybeans. **Soil Science News & Views**, [S. l.], v. 19, n. 2, p. 1-2, 1998.
- KOUTROUBRAS, S. D.; PAPA KOSTA, D. K.; GAGIANAS, A. A. The importance of early dry matter and nitrogen accumulation in soybean yield. **European Journal of Agronomy**, [S. l.], v. 9, n. 1, p. 1-10, 1998.
- KUMAWAT, S. M.; DHAKAR, L. L.; MALIWAL, P. L. Effect of irrigation regimes and nitrogen on yield, oil content and nutrient uptake of soybean (*Glycine max*). **Indian Journal of Agronomy**, v. 45, n. 2, p. 361-366, 2000.
- LAMOND R. E.; WESLEY, T. T. In-season fertilization for high yield soybean production. **Better Crops**, [S. l.], v. 85, n. 2, p. 6-11, 2001.
- MENDES, I. C. *et al.* Adubação nitrogenada suplementar tardia em soja cultivada em latossolos do Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 8, p. 1053-1060, 2008.
- MENZA, N. C. *et al.* Is soybean yield limited by nitrogen supply?. **Field Crops Research**, [S. l.], v. 213, p. 204-212, 2017.
- PAEK, N. C. *et al.* Nutritional control of soybean seed storage protein. **Crop Science**, [S. l.], v. 37, n. 2, p. 498-503, 1998.
- PAPACOSTA, D. K.; VERESOGLOU, D. S. Responses of soybean cultivars to inoculation and nitrogen application in Greece in fields free of *Bradyrhizobium japonicum*. **Journal of Agronomy and Crop Science**, [S. l.], v. 163, p. 275-283, 1989.
- PURCELL, L. C. *et al.* Soybean N<sub>2</sub> fixation estimates, ureide concentration, and yield responses to drought. **Crop Science**, [S. l.], v. 44, n. 2, p. 484-492, 2004.
- ROSA, R. S.; MESSIAS, R. A.; AMBROZINI, B. **Importância da compreensão dos ciclos biogeoquímicos para o desenvolvimento sustentável**. 2003. 56f. Monografia (Graduação em Química) - Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2003. Disponível em: <http://www.iqsc.usp.br/iqsc/servidores/docentes/pessoal/mrezende/arquivos/EDUC-AMB-Ciclos-Biogeoquimicos.pdf>. Acesso em: 02 dez. 2019.
- ROYAL SOCIETY. **Reaping the benefits: science and the sustainable intensification of global agriculture**. London: Royal Society, 2009.
- SALVAGIOTTI, F. *et al.* Nitrogen uptake: fixation and response to fertilizer N in soybeans: a review. **Field Crops Research**, [S. l.], v. 108, n. 1, p. 1-13, 2008.
- SANTOS, L. P. *et al.* Adubação nitrogenada e molíbdica da cultura da soja em Viçosa e Coimbra, Minas Gerais. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 47, n. 269, p. 33-48, 2000.
- SHIBLES, R. M. Soybean nitrogen acquisition and utilization. *In*: SHIBLES, R. M. **Proceedings of the North Central Extension-Industry Soil Fertility Conference**. 28 ed. St. Louis: Potash & Phosphate Inst., Brookings, 1998. p. 5-11.

SINCLAIR, T. R. *et al.* Drought tolerance and yield increase of soybean resulting from improved symbiotic N<sub>2</sub> fixation. **Field Crops Research**, [S. l.], v. 101, n. 1, p. 68-71, 2007.

SINGH, G.; SINGH, H.; KOLAR, J. S. Response of soybean (*Glycine max* L. Merrill) to nitrogen, phosphorus and zinc fertilization. **Journal Research Punjab Agricultural University**, [S. l.], v. 38, p. 14-16, 2001.

SOARES NOVO, M. C. S. *et al.* Nitrogênio e potássio na fixação simbiótica de N<sub>2</sub> por soja cultivada no inverno. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 56, n. 1, p. 143-155, 1999.

TAMAGNO, S. *et al.* Nutrient partitioning and stoichiometry in soybean: a synthesis-analysis. **Field Crops Research**, [S. l.], v. 200, p. 18-27, 2017.

TEIXEIRA, W. F. *et al.* Estimativa da fixação biológica do nitrogênio ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura de soja. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SOJA, 8., 2018, Goiânia. **Anais [...]**. Brasília: Embrapa, 2018. p. 326-329.

THIES, J. E.; SINGLETON, P. W.; BOHLOOL, B. B. Phenology, growth: and yield of fieldgrown soybean and bush bean as a function of varying modes of N nutrition. **Soil Biology and Biochemistry**, [S. l.], v. 27, n. 4-5, p. 575-583, 1995.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). **Production, supply and distribution online**. 2018. Disponível em: <https://www.fas.usda.gov/psdonline/psdquery.aspx>. Acesso em: 10 jun. 2019.

VAN ITTERSUM, M. K. *et al.* Yield gap analysis with local to global relevance a review. **Field Crops Research**, [S. l.], 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.

VARGAS, M. A. T.; PERES, J. R. R.; SUHET, A. R. Fixação de nitrogênio atmosférico pela soja em solos de cerrado. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 8, n. 94, p. 20-23, 1982.

VASCONCELOS, I.; PAIVA, J. B.; FONTANA, J. N. E. Efeito da interação rizóbio-adubação nitrogenada em soja, *Glycine max* (L) Merril. In: REGO, G. M. *et al.* **Soja**: resumos informativos. Brasília: EMBRAPA/CNPQ, 1978, p. 222-223.

VIEIRA, R. F. **Ciclo do nitrogênio em sistemas agrícolas**. Brasília: Embrapa, 2017. 163p.

WESLEY, T. L. *et al.* Effects of late-season nitrogen fertilizer on irrigated soybean yield and composition. **Journal of Production Agriculture**, [S. l.], v. 11, n. 3, p. 331-336, 1998.

WOLI, K. P. *et al.* Liquid swine manure application to soybean and residual-year nitrogen supply to corn. **Soil Science Society of America Journal**, [S. l.], v. 77, n. 5, p. 1684-1695, 2013.

WOOD, C. W.; TORBERT, H. A.; WEAVER, D.B. Nitrogen fertilizer effects on soybean growth, yield, and seed composition. **Journal of Production Agriculture**, [S. l.], v. 6, n. 3, p. 354-360, 1993.

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

ZANON, A. J. *et al*. Growth habit effect on development of modern soybean cultivars after beginning of bloom in Rio Grande do Sul. **Bragantia**, Campinas, v. 75, n. 4, p. 446-458, 2016.

**APÊNDICE A - FOTOS DA CONDUÇÃO DOS EXPERIMENTOS DE NITROGÊNIO**