

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
COLÉGIO POLITÉCNICO DA UFSM
PPGAP – PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA DE PRECISÃO
MESTRADO PROFISSIONAL EM AGRICULTURA DE PRECISÃO

Vagner Portes Guesser

**ZONAS DE MANEJO DO TEOR DE FÓSFORO (P) E RESPOSTA DA SOJA
INOCULADA COM SOLUBILIZADOR DE FOSFATO**

Santa Maria, RS
2022

Vagner Portes Guesser

**ZONAS DE MANEJO DO TEOR DE FÓSFORO (P) E RESPOSTA DA SOJA
INOCULADA COM SOLUBILIZADOR DE FOSFATO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agricultura de Precisão da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Agricultura de Precisão**.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Leonel Bottega
Co-Orientadora: Prof. Dra. Zanandra Boff de Oliveira

Santa Maria, RS
2022

PORTES GUESSER, VAGNER

ZONAS DE MANEJO DO TEOR DE FÓSFORO (P) E RESPOSTA DA
SOJA INOCULADA COM SOLUBILIZADOR DE FOSFATO / VAGNER
PORTES GUESSER.- 2022.

51 f.; 30 cm

Orientador: Eduardo Leonel Bottega

Coorientadora: Zanandra Boff de Oliveira

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Colégio Politécnico, Programa de Pós-Graduação em
Agricultura de Precisão, RS, 2022

1. Fósforo 2. Geoestatística 3. Bacillus sp. 4.
Microorganismos 5. Agricultura de Precisão I. Leonel
Bottega, Eduardo II. Boff de Oliveira, Zanandra 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, VAGNER PORTES GUESSER, 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.

Vagner Portes Guessser

**ZONAS DE MANEJO DO TEOR DE FÓSFORO (P) E RESPOSTA DA SOJA
INOCULADA COM SOLUBILIZADOR DE FOSFATO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agricultura de Precisão da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Agricultura de Precisão**.

Aprovado em: 18 de Agosto de 2022.

**Eduardo Leonel Bottega, Dr. (UFSM) Videoconferência
(Presidente/ Orientador)**

Luciano Zucuni Pes, Dr. (UFSM) Videoconferência

Alberto Eduardo Knies, Dr. (UERGS) Videoconferência

Santa Maria, RS
2022

AGRADECIMENTOS

À Deus por permitir chegar a esta etapa de minha vida profissional e acadêmica.

À minha família pelo apoio incondicional em todas as tomadas de decisões até aqui realizadas.

À minha namorada Sandra Lúcia Parcianello Foggiato pelas palavras de incentivo à realização deste objetivo.

À Universidade Federal de Santa Maria e ao corpo docente do PPGAP pelos ensinamentos compartilhados, em especial ao orientador professor Eduardo Leonel Bottega tempo dispendido na troca de informações inerentes ao trabalho.

Aos colegas Engenheiros Agrônomos Cauê Ferreira Pires, Rodolpho Gonçalves Silveira e Tiago Bueno da Silva pelo auxílio no desenvolvimento e coleta de dados do trabalho assim como a troca de informações sempre oportuna.

À Estância Gutambu em nome de seu proprietário Valter José Potter pela cedência do local experimental, disponibilidade de insumos e máquinas agrícolas para que o projeto pudesse ser instalado e finalizado. Além dos Engenheiros Agrônomos Bruno Giacomini Cera e Tamires Hoppe pelo auxílio nas etapas de instalação, colheita e disponibilização de informações relevantes ao trabalho.

Enfim, a todos que colaboraram. **MUITO OBRIGADO!**

RESUMO

ZONAS DE MANEJO DO TEOR DE FÓSFORO (P) E RESPOSTA DA SOJA INOCULADA COM SOLUBILIZADOR DE FOSFATO

Autor: Vagner Portes Guesser
Orientador: Dr. Eduardo Leonel Bottega
Co-Orientadora: Prof Dra. Zanandra Boff de Oliveira

O fósforo (P) atua no metabolismo energético das plantas e na maioria dos solos brasileiros sua disponibilidade é baixa, sendo que microorganismos solubilizadores de fosfatos (MSP) são promissores na disponibilização de P as plantas, pela disponibilização de fosfatos insolúveis. Também, a variabilidade espacial do P consegue ser estimada através da agricultura de precisão e gerar zonas de manejo de sua disponibilidade. O trabalho foi conduzido no município de Dom Pedrito-RS, em área experimental de 5,7 ha⁻¹. A determinação da variabilidade espacial do teor de P no solo foi medida em grade amostral regular com 40 pontos, da camada 0 a 20 cm. A detecção da variabilidade espacial, modelagem geoestatística, confecção do mapa temático do teor de P e geração de zonas de manejo de P se deram através do software QGIS versão 3.16, com uso do plugin Smart Map. A cultivar utilizada foi a BMX Zeus Ipro com 18 sementes m⁻¹, espaçada 50 cm⁻¹. O solubilizador de fósforo continha as cepas B119 (*Bacillus megaterium*) e B2084 (*Bacillus subtilis*) com 4x10⁹ células viáveis por ml de produto, aplicado via jato dirigido no sulco de semeadura na dose de 200 ml⁻¹ de produto comercial ha⁻¹ e vazão de 20 litros ha⁻¹. A fonte mineral solúvel foi aplicada na linha de semeadura em dose de 80 kg ha⁻¹ de pentóxido de difosfato (P₂O₅). O delineamento experimental foi de blocos ao acaso em esquema fatorial 2 (zonas de manejo) x 3 (fontes de disponibilidade) e 4 repetições. Mensurou-se o teor de P no grão (%), nas folhas (g kg⁻¹ matéria seca) e no solo (mg dm⁻³), a massa de mil grãos (g⁻¹) e a produtividade (kg ha⁻¹). A massa de mil grãos aumentou em 5,84% com solubilizador e 4,79% com a fonte de P mineral. O teor de P no grão foi 5,55% maior com a fonte mineral, comparado a testemunha, não diferindo dos teores observados para o solubilizador. O fornecimento de P via fonte mineral resultou em maior teor de P no solo após a colheita da soja. A produtividade foi maior com a fonte mineral e solubilizador, comparada à testemunha. Zonas de manejo de maior disponibilidade de P apresentaram produtividade 9,44% acima da ZM de menor disponibilidade. O teor de P nos grãos foi maior em ZM de menor disponibilidade de P. A produtividade é responsiva a adição de P em zonas de menor disponibilidade, com aumento de 8,51% via solubilizador e 11,57% via fonte mineral, em relação a não adição do nutriente. A delimitação de ZM, com base na disponibilidade de P no solo indicou redução no custo com fornecimento de P, seja via fonte mineral ou solubilizador. O solubilizador de P conseguiu suprir a demanda da soja e pode substituir a fonte mineral quando os teores de P no solo se encontram acima do limite inferior da classe de interpretação médio.

Palavras-chave: fósforo, geoestatística, *Bacillus* sp., microorganismos, agricultura de precisão.

ABSTRACT

PHOSPHORUS (P) CONTENT MANAGEMENT ZONES AND RESPONSE OF SOYBEAN INOCULATED WITH PHOSPHATE SOLUBILIZER

Author: Vagner Portes Guesser

Advisor: Dr. Eduardo Leonel Bottega

Co-Advisor: Prof Dra. Zanandra Boff de Oliveira

Phosphorus (P) acts on the energy metabolism of plants and in most Brazilian soils its availability is low, and phosphate solubilizing microorganisms (MSP) are promising in the availability of P to plants, through the availability of insoluble phosphates. Also, the spatial variability of P can be estimated through precision agriculture and generate management zones for its availability. The work was carried out in the municipality of Dom Pedrito-RS, in an experimental area of 5.7 ha⁻¹. The determination of the spatial variability of the P content in the soil was measured in a regular sampling grid with 40 points, from the layer 0 to 20 cm. The detection of spatial variability, geostatistical modeling, preparation of the thematic map of P content and generation of P management zones were performed using the QGIS software version 3.16, using the Smart Map plugin. The cultivar used was BMX Zeus Ipro with 18 seeds m⁻¹, spaced 50 cm⁻¹. The phosphorus solubilizer contained strains B119 (*Bacillus megaterium*) and B2084 (*Bacillus subtilis*) with 4x10⁹ viable cells per ml of product, applied via directed jet in the sowing furrow at a dose of 200 ml⁻¹ of commercial product ha⁻¹ and flow of 20 liters ha⁻¹. The soluble mineral source was applied to the sowing line at a dose of 80 kg ha⁻¹ of diphosphate pentoxide (P₂O₅). The experimental design was randomized blocks in a factorial scheme 2 (management zones) x 3 (sources of availability) and 4 replications. The P content in the grain (%), in the leaves (g kg⁻¹ dry matter) and in the soil (mg dm⁻³), the weight of a thousand grains (g⁻¹) and the productivity (kg ha⁻¹). The thousand-grain mass increased by 5.84% with the solubilizer and 4.79% with the mineral P source. The P content in the grain was 5.55% higher with the mineral source, compared to the control, not differing from the levels observed for the solubilizer. The supply of P via mineral source resulted in higher P content in the soil after the soybean harvest. Productivity was higher with the mineral source and solubilizer, compared to the control. Management zones with higher P availability showed productivity 9.44% above the ZM with lower availability. The P content in the grains was higher in ZM with lower P availability. Yield is responsive to the addition of P in areas of lower availability, with an increase of 8.51% via solubilizer and 11.57% via mineral source, compared to the non-addition of the nutrient. The delimitation of ZM, based on the availability of P in the soil, indicated a reduction in the cost of supplying P, either via mineral source or solubilizer. The P solubilizer was able to supply the soybean demand and can replace the mineral source when the P contents in the soil are above the lower limit of the average interpretation class.

Keywords: phosphorus, geostatistics, *Bacillus* sp., microorganisms, precision agriculture.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa de localização do município de Dom Pedrito-RS no Estado do Rio Grande do Sul.....	21
Figura 2 - Polígono da área de estudos e pontos amostrais utilizados como base na mensuração do teor de P do solo para delimitação de zonas de manejo. Santa Maria-RS, 2022.....	22
Figura 3 – Amostra de tecido vegetal composta pelo trifólio de soja coletado para mensuração do teor foliar de P em g kg ⁻¹ de Matéria Seca.....	25
Figura 4 – Máquina agrícola (A), colheita (B), visão da parcela colhida (C), descarregamento (D), “bag” para coleta de grãos (E) pesagem (F) e separação de amostras (G).....	25
Figura 5 – Amostra de grãos de soja coletados durante a colheita para mensuração da massa de mil grãos (MMG). Santa Maria-RS.2022.....	26
Figura 6 - Modelagem do semivariograma e validação cruzada no plugin Smart Map do software QGIS.....	28
Figura 7 – Mapa temático do teor de fósforo no solo através de krigagem ordinária no plugin Smart Map do software QGIS.....	29
Figura 8 – Zonas de manejo delimitadas através do mapa do teor de P oriunda da krigagem ordinária no plugin Smart Map do software QGIS.....	29
Figura 9 – Efeito das fontes de disponibilidade de P na massa de mil grãos (gramas) da cultura da soja. Santa Maria-RS, 2022.....	31
Figura 1 – Teor de P no grão (%) de soja em diferentes fontes para disponibilizar fósforo à cultura. Santa Maria-RS, 2022.....	32
Figura 2 – Teor de P no grão (%) de soja em diferentes zonas de disponibilidade de fósforo (P) a cultura. Santa Maria - RS, 2022.....	32
Figura 3 – Desdobramento da interação entre fator A (fontes de disponibilidade de P) e fator B (zonas de disponibilidade de P) para o teor de P no solo (mg dm ³) após a colheita da cultura da soja. Santa Maria-RS, 2022.....	33
Figura 4 – Efeito das fontes de disponibilidade de P no teor de P no solo (mg dm ⁻³) após a colheita da cultura da soja. Santa Maria-RS, 2022.....	34
Figura 5 – Efeito das zonas de disponibilidade de P para o teor de P no solo (mg dm ³) após a colheita da cultura da soja. Santa Maria-RS, 2022.....	35
Figura 6 – Desdobramento da interação entre fator A (fontes de disponibilidade de P) e fator B (zonas de disponibilidade de P) para a produtividade de grãos de soja (kg ha ¹). Santa Maria-RS, 2022.....	37
Figura 7 – Efeito das fontes de disponibilidade de P na produtividade de grãos de soja (kg ha ⁻¹). Santa Maria-RS, 2022.....	38
Figura 8 – Efeito das zonas de disponibilidade de P na produtividade de grãos de soja (kg ha ⁻¹). Santa Maria-RS, 2022.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo da análise de variância com os quadrados médios para as variáveis massa de mil grãos (MMG), teor de fósforo no solo (P Solo), teor de fósforo na folha (P Folha), teor de fósforo no grão (P Grão) e produtividade em kg ha ⁻¹ (Prod).....	30
---	----

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
2 OBJETIVOS.....	13
2.1 OBJETIVO GERAL.....	13
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
3 REVISÃO DE LITERATURA.....	14
3.1 AGRICULTURA DE PRECISÃO DA FERTILIDADE DO SOLO E ZONAS DE MANEJO.....	14
3.2 DINÂMICA DO FÓSFORO NO SOLO.....	15
3.3 MICROORGANISMOS SOLUBILIZADORES DE FÓSFORO.....	17
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	21
4.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL.....	21
4.2 AMOSTRAGEM, MODELAGEM DA DEPENDÊNCIA ESPACIAL E DEFINIÇÃO DE ZONAS DE MANEJO.....	22
4.3 IMPLANTAÇÃO DO ENSAIO E PRÁTICAS DE MANEJO EMPREGADAS.....	23
4.4 COLETA DE DADOS E ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....	24
4.4.1 Análise Foliar do Teor de Fósforo.....	24
4.4.2 Produtividade em kg ha ⁻¹	25
4.4.3 Massa de Mil Grãos (MMG).....	26
4.4.4 Análise do Teor de P do solo após colheita.....	26
4.4.5 Análise do Teor de P no Grão.....	26
4.4.6 Análises Estatísticas.....	27
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	28
6 CONCLUSÃO.....	40
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	41
REFERÊNCIAS.....	42

1 INTRODUÇÃO

O fósforo (P) é um dos elementos essenciais para o crescimento e desenvolvimento vegetal (ALORI et al. 2017), presente nos solos na forma orgânica e inorgânica, sendo fundamental no metabolismo energético das plantas (SMITH, 2002). Em solos com maior grau de intemperização, como os brasileiros, há o predomínio de argilominerais constituídos por ferro (Fe) e alumínio (Al), assim como solos com pH básico possuem teores elevados de cálcio (Ca), todos carregados eletropositivamente. Para manter o teor de P no solo e suprir a demanda das plantas é feito uso da aplicação de fertilizantes fosfatados inorgânicos, os quais na solução do solo formam ânions ortofosfatos, carregados eletronegativamente, e portanto possuem grande poder de adsorção aos colóides catiônicos.

Segundo Sharma et al. (2013), após a aplicação, até 90% do fósforo aplicado via fertilizante inorgânico acaba adsorvido ou precipitado aos colóides e não disponibilizado as plantas. Não obstante, o P remanescente na solução do solo continua em ampla concorrência entre a planta e a superfície dos minerais, o que faz com que os solos intemperizados possuam baixa disponibilidade natural para o P disponível na solução e que possa ser absorvido pela planta.

Desta forma, anualmente ocorre a fertilização fosfatada afim de regular a manutenção dos teores de P no solo. Porém, essa prática acaba por contribuir para o aumento do custo de produção, o que instiga a pesquisa científica a investigar estratégias agrícolas capazes de melhorar a eficiência da adubação fosfatada e sua disponibilidade as culturas.

Uma das linhas de investigação é a utilização de microrganismos como promotores da disponibilidade do P na solução do solo, objetivando utilizar não só da química como da biologia em favor da manutenção de níveis adequados do nutriente a cultura de interesse. De acordo com Babalola; Glick (2012) e Alori et al. (2017), existem uma gama de microorganismos como fungos e bactérias os quais atuam em processos biológicos que conseguem modificar P insolúvel em solúvel no solo pela solubilização do P mineral insolúvel e mineralização do P inorgânico insolúvel.

Os teores de P não se apresentam homogêneos nas áreas de cultivo agrícola, assim como acontece com outros atributos do solo que interagem com a disponibilidade de P para as plantas, como é o caso do Fe, Al, Ca, potencial hidrogeniônico (pH) e argila. Esta heterogeneidade determina a variabilidade espacial do P na solução do solo. Atualmente com uso do geoprocessamento, conseguisse um levantamento detalhado do teor de P do solo para cada fração do talhão, onde as tecnologias de agricultura de precisão (AP) usam da espacialização

da condição nutricional para criação de zonas específicas de disponibilidade, denominadas zonas de manejo (ZM).

Após mapeada a variabilidade do teor de P no solo é possível a delimitação de ZM. Estas ZM podem auxiliar na tomada de decisão quanto a ações que visam o manejo do P que buscam otimizar sua disponibilização para as plantas, como é o caso do uso de microorganismos solubilizadores de fósforo (MSP). Entretanto, a literatura ainda carece de estudos sobre a utilização de MSP com base em ZM com diferentes potenciais de disponibilidade de P no solo.

Desta forma, o estudo da variabilidade das características químicas do P no solo pela definição de ZM, além do comportamento de MSP e de fertilização química, ainda não foram estudadas e podem possibilitar um melhor entendimento da contribuição dos microorganismos em faixas de disponibilidade de P e assim contribuir para práticas agrícolas de manejo mais sustentáveis ambiental e economicamente, sendo este o objeto de estudo do presente trabalho, utilizando como planta indicadora a cultura da soja.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

- Avaliar a resposta da cultura da soja e o teor de P no solo em função da inoculação, via sulco, de bactérias solubilizadoras de fosfato e a fertilização química, com base em zonas de manejo.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Mapear a variabilidade espacial do teor de P do solo.
- Delimitar ZM com base na variabilidade espacial do P, através de geoestatística.
- Estudar o efeito da inoculação de bactérias solubilizadoras de P, em diferentes ZM, no teor de P no solo e na planta.
- Estudar o efeito da aplicação de fonte mineral de P, em diferentes ZM, no teor de P no solo e na planta.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 AGRICULTURA DE PRECISÃO DA FERTILIDADE DO SOLO E ZONAS DE MANEJO

Devido ao processo de intemperismo os solos brasileiros apresentam, em geral, acidez elevada, baixa fertilidade, principalmente P e matéria orgânica, o que os tornam limitantes ao desenvolvimento e produtividade das culturas (MELO et al., 2015). Assim, os solos são fertilizados anualmente, visando manter o desenvolvimento das plantas, fazendo do Brasil o quarto colocado mundial em consumo de fertilizantes (BONONI et al., 2020).

Entretanto, em uma mesma área há uma variabilidade espacial da fertilidade do solo (SERRANO et al., 2010), sendo esta passível de identificação através de métodos geoestatísticos e de mapeamento digital de solos (ANDRADE; MENDONÇA-SANTOS, 2016), permitindo ajustar o manejo nutricional para locais específicos (AMADO et al., 2009). A prática de recomendação de fertilizantes em doses variadas e locais específicos é uma das ferramentas de Agricultura de Precisão (AP), a qual investiga a heterogeneidade da lavoura e permite a tomada de decisão para cada fração da mesma (ANTONINI et al., 2018; GEALIN et al., 2021).

A AP se refere a um conjunto de ações de gestão ou de gerenciamento da produção agrícola em que o uso da tecnologia auxilia na adoção de manejos mais assertivos utilizando como base a variabilidade espacial e temporal que limitam a produtividade da cultura de interesse (BORGES et al., 2022). Para Antonini et al. (2018) a AP foi impulsionada devido ao incremento da tecnologia em satélites e aos sistemas de navegação como o sistema de posicionamento global (GPS), utilizados, em primeiro plano, na construção civil. O uso da geolocalização possibilitou o mapeamento da variabilidade espacial das propriedades agrícolas e aplicação de insumos localizados, considerando de forma heterogênea o ambiente produtivo.

Como integrante da AP, a fertilidade do solo foi a que mais se beneficiou com advento das aplicações a taxa variadas. Paris et al. (2020) citaram que a variabilidade espacial da fertilidade e uso de aplicações direcionadas a real necessidade do solo e planta alteraram positivamente a média da produtividade por unidade de área cultivada. Ainda, Amado et al. (2009) citaram que o levantamento pontual da necessidade do solo e cultura através de sua variabilidade espacial permite o ajuste com precisão da melhor estratégia de manejo da propriedade e este fator reflete na melhoria da gestão da produtividade agrícola.

Desta forma, a AP permitiu o acompanhamento da variação espacial de atributos de solo e planta, contribuindo para o planejamento e otimização das etapas de manejo na produção

agrícola (BERNARDI et al. 2015). Identificando áreas específicas para o manejo da fertilidade do solo (SILVA et al. 2003) onde pela coleta de uma amostra composta, são extraídas informações referentes a fertilidade e avaliadas ponto a ponto (MACHADO et al., 2018).

Para que a variabilidade espacial pudesse ser entendida e predita em locais não amostrados, a geostatística foi fundamental para a caracterização da estrutura e da magnitude da dependência espacial das variáveis e melhoria do entendimento das relações existentes entre os atributos do solo (BARBIERI et al., 2020), o que permitiu uma melhor adequação dos recursos no solo com enfoque em aumento de produtividade (MIRANDA; VERISSIMO; CEOLIN, 2017).

Como mencionado, o entendimento da variabilidade espacial da fertilidade e uso da geostatística para predizer locais não amostrados foi possível o aprimoramento da espacialização dos atributos químicos. Entretanto, um dos problemas desse modelo é a necessidade de uma grade amostral densa para geração de mapas confiáveis através da geostatística da variabilidade espacial, sendo uma forma mais econômica e operacionalmente vantajosa a geração de zonas de manejo (ZM) (RODRIGUES JUNIOR et al., 2011).

As ZM são caracterizadas como sub regiões com produtividade ou necessidade de nutrientes semelhantes a qual se pode aplicar uma dose uniforme de insumo (RODRIGUES JUNIOR et al., 2011). Assim, a determinação das ZM está condicionada em primeiro momento ao conhecimento da variabilidade espacial de campo (BARBOSA et al., 2019).

Esta variabilidade pode ser qualquer atributo diagnóstico como fertilidade, produtividade, zonas semelhantes em imagens de satélite, condutividade elétrica aparente semelhantes, resistência a penetração, ou correlação de diferentes atributos (AMADO et al., 2007, DELALIBERA et al., 2012; DIACONO et al., 2012; ROSALEN et al., 2011). Estas variáveis, através de diferentes técnicas para agrupamento de dados, têm sido usadas para sua delimitação das ZM (RODRIGUES; CORÁ, 2015; RODRIGUES JUNIOR et al., 2011; VALENTE et al., 2012). Segundo, Zeraatpisheh et al. (2022) a identificação da uniformidade do solo em ZM homogêneas é fundamental na expansão agrícola de determinada propriedade, como também permite uma racionalização de recursos e assim uma maior sustentabilidade no uso do solo por maiores períodos.

3.2 DINÂMICA DO FÓSFORO NO SOLO

O P é um dos mais importantes nutrientes para as plantas por fazer parte da estrutura dos ácidos nucléicos, fosfolipídios, adenosinatrifosfato (ATP) e adenosinadifosfato (ADP).

Além disso, é elemento essencial na divisão celular, reprodução e no metabolismo vegetal (ANGHINONI; BISSANI, 2004), ou seja, é o maior atuante no metabolismo energético das plantas (ALEWELL et al., 2020; DUARTE et al., 2016; HEINRICHS; SOARES FILHO, 2014; NESME; METSON; BENNETT, 2018).

O P é constitui cerca de 0,2% do peso seco de uma planta, sendo o segundo nutriente, atrás do nitrogênio, que mais limita o crescimento e desenvolvimento das culturas (AZZIZ et al., 2012; TAK et al., 2012). E toma maior importância na agricultura por ser um recurso não renovável que levou de 10 a 15 milhões de anos para sua formação, o qual pela demanda agrícola crescente tende a escassez (CORDELL; DRANGERT; WHITE, 2009).

Nussaume et al. (2011) citaram que a partir de 2009 as reservas de rochas contendo P estavam em torno de 16 bilhões de toneladas, com conteúdo de P inorgânico em 30%. Desta forma, com aumento da demanda alimentar e constante exploração do P, estima-se que as reservas durem cerca de 300 a 400 anos (VAN KAUFENBERGH, 2010). De Oliveira (2020) citam que o P acumulado no solo poderia manter a produtividade das culturas mundialmente por cerca de 100 anos, além disso, é considerado o 11º elemento mais abundante na crosta terrestre, porém sua disponibilidade para as plantas é baixa (LIAN et al. 2019; ZHU et al., 2011).

No Brasil as reservas de P representam 1% de toda a reserva mundial, em sua maioria de baixa solubilidade (DESMIDT et al., 2015). Mundialmente, as reservas remanescentes possuem baixa qualidade e os custos de extração são caros, assim o fornecimento de fontes fosfatadas de melhor qualidade está em redução (CORDELL et al., 2009).

Uma característica única do elemento é sua baixa disponibilidade devido à lenta difusão e alta adsorção/precipitação no solo (SHEN et al., 2011). Assim, a maior parte do P não pode ser absorvida pelas plantas. Apenas 0,1% do fósforo total no solo está disponível para absorção (NOVAIS; SMYTH, 1999; ZHU et al., 2011; WIENS et al. 2019), devido a sua ligação à fração mineral com alta força de atração (SANTOS; GATIBONI; KAMINSKI, 2008), sendo reabastecido pela dessorção dos minerais do solo e pela mineralização do fósforo orgânico (BÜNEMANN, 2015).

O P existente no solo encontra-se em formas orgânicas e inorgânicas (SOUZA JÚNIOR et al., 2012). O P orgânico constitui mais de 20% do fósforo total no solo (RAWAT et al., 2021), está contido na biomassa microbiana, resíduos vegetais e animais, importante as culturas pela alta taxa de renovação e pela reduzida fixação (RICHARDSON et al., 2011). Sua disponibilização ocorre pela mineralização, através da hidrólise de ligações com grupos orgânicos, realizado por microorganismos e por enzimas como as fosfoproteínas, fosfatases,

fitases e nucleotidasas (LIM et al., 2007; KHAN; ZAIDI; WANI, 2007). A biomassa microbiana contém uma quantidade significativa de P em sua composição, a qual pode ser facilmente disponível as plantas (ABDEL-GHANY et al., 2019).

O P inorgânico pode estar disponível ou adsorvido as partículas do solo. As formas disponíveis predominantes são o ácido fosfórico (H_3PO_4), ácido monofosfórico (HPO_4^{2-}) e íons fosfato (PO_4^{3-}), com predominância do ácido ortofosfórico ($H_2PO_4^-$), entre o pH 5.0 e 6.5, onde ocorre sua maior disponibilidade (NUSSAUME et al., 2011; MENDES; DOS REIS JUNIOR, 2003). Assim a absorção de P inorgânico pelas plantas em solos mais ácidos é na forma de HPO_4^{2-} e $H_2PO_4^-$, em pH mais básico (WAKELIN et al., 2004).

O P adsorvido está fortemente ligado a minerais como cálcio em solos básicos formando fosfato de cálcio em um processo denominado de precipitação e alumínio e ferro em solos ácidos formando fosfato de alumínio e fosfato ferroso, denominado de adsorção (SATYAPRAKASH et al, 2017; KUMAR; KUMAR; PATEL, 2018; HAVLIN et al., 2005). Desta forma, é estimado em apenas 20% a disponibilidade do total ofertado via adubação fosfatada para as plantas (VANCE, 2001). Ainda, na solução do solo a concentração de fósforo é geralmente muito baixa (2 a 5 μm) onde a absorção de P é um processo ativo que acontece contra um gradiente de concentração, tendo em vista que, no citoplasma, deve-se manter uma concentração entre 5 e 10 μm (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006).

Assim, pela sua limitação as culturas agrícolas e visando compensar a quantidade do elemento retido no solo periodicamente se faz aporte de fertilizantes fosfatados visando manter os teores de P em equilíbrio para que consiga nutrir as culturas (DE OLIVEIRA et al., 2020; MALAVOLTA, 2006). Entretanto, com intuito de aumentar a eficiência e aproveitamento da adubação fosfatada, buscando reduzir os custos de produção e possíveis problemas ambientais gerados, novas alternativas e tecnologias têm sido estudadas (CHAGAS et al., 2010), sendo o uso de microorganismos solubilizadores de fósforo (MSP) uma das tecnologias promissoras para solubilizar P inorgânico, assim como, a mineralização do P orgânico, deixando-o prontamente disponível para a planta (GOMES et al. 2016; KHAN; ZAIDI; WANI, 2007).

3.3 MICROORGANISMOS SOLUBILIZADORES DE FÓSFORO

A maioria dos solos possui quantidades consideráveis de P, mas uma grande proporção está ligada aos seus constituintes. Apenas 20 % do total de P adicionado ao solo fica disponível a absorção das plantas (SHARMA et al., 2013; PAVINATO et al., 2020). Sendo assim, há constante busca de uma tecnologia que possa fornecer P suficiente para as plantas, reduzindo a

dependência de fertilizantes químicos (ZAIDI, KHAN, AHMED, 2009).

O uso de MSP surge como uma alternativa para disponibilizar o nutriente as plantas e reduzir a dependência de fertilizantes fosfatados. Isso ocorre pela reversão das reações de precipitação e adsorção, mediadas pela ação metabólica de microrganismos (PATINOTORRES SANCLEMENTE-REYES, 2014).

Diversos grupos de microrganismos possuem a capacidade de solubilizar fósforo. Goldstein et al. (1999) citaram que bacteriais, encontradas em abundância no solo, principalmente as gram-negativas são mais eficientes na solubilização. Chen et al. (2006) citam que as bactérias solubilizadoras de P podem representar até 50% da comunidade existente no solo, e também citam os fungos solubilizadores abrangem com até 0,5% da população total.

Os fungos dos gêneros *Aspergillus* e *Penicillium* são citados em diversos trabalhos como eficientes solubilizadores de P tanto do material de origem do solo quanto dos fertilizantes fosfatados (COUTINHO et al. 2012; SIQUEIRA et al. 2004; MENDES et al. 2014; KALAYU, 2019). De Oliveira (2014) em seu estudo destacaram que o fungo *Aspergillus niger* FS1 demonstrou solubilizar vários tipos de fosfatos insolúveis, 100% do P na forma de fosfato de cálcio ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$), 71% na forma de fosfato de Al (AlPO_4) e 36% na forma de fosfato de ferro (FePO_4), sendo a redução do pH o mecanismo de solubilização do $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ e a formação de ácidos orgânicos para AlPO_4 e FePO_4 , principalmente ácido oxálico e ácido cítrico.

Bononi et al. (2020) estudou estipes do fungo *Trichoderma*, isoladas da Floresta Amazônica e 19,5% das cepas foram capazes de solubilizar o fosfato. Siqueira et al. (2004) relatam que as bactérias dos gêneros *Bacillus*, *Pseudomonas* e *Agrobacterium* possuem a capacidade de liberar P do solo. Mesmos gêneros citados por Mahdi et al. (2011) que ainda somam a elas os gêneros *Micrococcus*, *Burkholderia*, *Rhizobium*, *Azotobacter* e *Erwinia*, com este potencial. Wang et al. (2020), na China, isolaram da rizosfera de soja, gêneros de bactérias *Bacillus* e *Pseudomonas* as quais conseguiram solubilizar P através da secretação de ácidos orgânicos e produção de sideróforos.

A Embrapa Milho e Sorgo recentemente isolou duas estirpes de bactérias, *Bacillus subtilis* (CNPMS B2084) e *Bacillus megaterium* (CNPMS B119), capazes de solubilizar $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ e da rocha matriz pela produção da enzima fosfatase, além de solubilizar AlPO_4 e FePO_4 , pela produção de ácido glucônico e enzima fitase, respectivamente (ABREU et al., 2017; OLIVEIRA-PAIVA et al., 2021).

Estes processos envolvem a acidificação do solo, quelatação de metais e reações de troca iônica. Entretanto, o principal mecanismo de solubilização citado é a liberação de metabólitos como ácidos orgânicos e enzimas extracelulares (ABREU et al., 2017; BALIAH,

PANDIARAJAN, KUMAR, 2016), assim como a produção de sideróforos, moléculas de baixo peso molecular, cuja função é complexar metais, em especial Fe insolúvel (BATISTA et al., 2018).

A maioria dos MSP são naturalmente abundantes nos solos (LI et al., 2020). A solubilização do P ocorre pela liberação do P inorgânico ligados a óxidos de ferro (Fe), alumínio (Al) e cálcio (Ca) e das rochas fosfáticas, através da produção de ácidos orgânicos e pela mineralização do P orgânico através de enzimas, como fitase e fosfatases (OWEN et al. 2015; PAIVA et al. 2018; RICHARDSON; SIMPSON et al. 2011; VASSILEV et al., 2014).

O P inorgânico é disponibilizado ao solo pela quelação de cátions como Ca, Fe e Al ligados a fosfato, pela redução do pH e competição com o P ao local de adsorção (KISHORE, PINDI, REDDY, 2015). Os grupos hidroxila e carboxila dos ácidos orgânicos podem quelar os cátions ligados ao fosfato, convertendo-o assim em formas solúveis (LEE et al., 2012). A produção de ácidos orgânicos causa a redução do pH e H^+ substitui Ca^{2+} para liberar o íon fosfato (ALORI et al., 2017; ZAIDI et al., 2009).

Tomer et al. (2016) citam que os principais ácidos orgânicos secretados pelos MSP são o ácido cítrico, ácido oxálico e ácidos succínicos, além de enzimas como fosfatases, fitases e quelantes de íons como sideróforos que tornam o P disponível para as plantas. Assim, a produção de ácidos orgânicos é a principal forma de liberação de P de compostos inorgânicos insolúveis e do solo (DE OLIVEIRA et al., 2014), agindo na substituição do P na superfície de hidróxidos metálicos por meio de reações de troca de ligantes, dissolvendo hidróxidos que adsorvem P e complexando com metais em solução, evitando assim a precipitação de P com esses metais (JONES, 1998).

O P orgânico é liberado pelas enzimas fosfatases, que executam a desfosforilação de ligações fosfatadas na matéria orgânica, as fitases, que causam a liberação de P a partir do ácido fítico e as fosfonatases realizam a divisão da ligação entre carbono e fósforo (BEHERA et al., 2014). As fosfatases quebram as ligações fosfoéster, proporcionando a liberação de fosfatos inorgânicos e de nucleotídeos, sendo que são classificadas como fosfatases alcalinas agindo em $pH > 7$ ou ácidas $pH < 6$ (BEHERA et al., 2014). As fitases liberam especificamente P do fitato, que é a principal forma de compostos orgânicos de fósforo armazenados (RASUL et al. 2019).

Essas enzimas desempenham papéis importantes na reciclagem de fosfato orgânico do solo, e os microrganismos que produzem essas enzimas auxiliam as plantas adquirindo P da matéria orgânica no solo (RICHARDSON et al., 2011). As bactérias requerem Fe para o processo de quelação e formam o complexo sideróforo (MUNIR, BANO, FAISAL, 2019). A solubilização de P assim se dá pela quebra da ligação entre Fe e P e liberação do mesmo ao

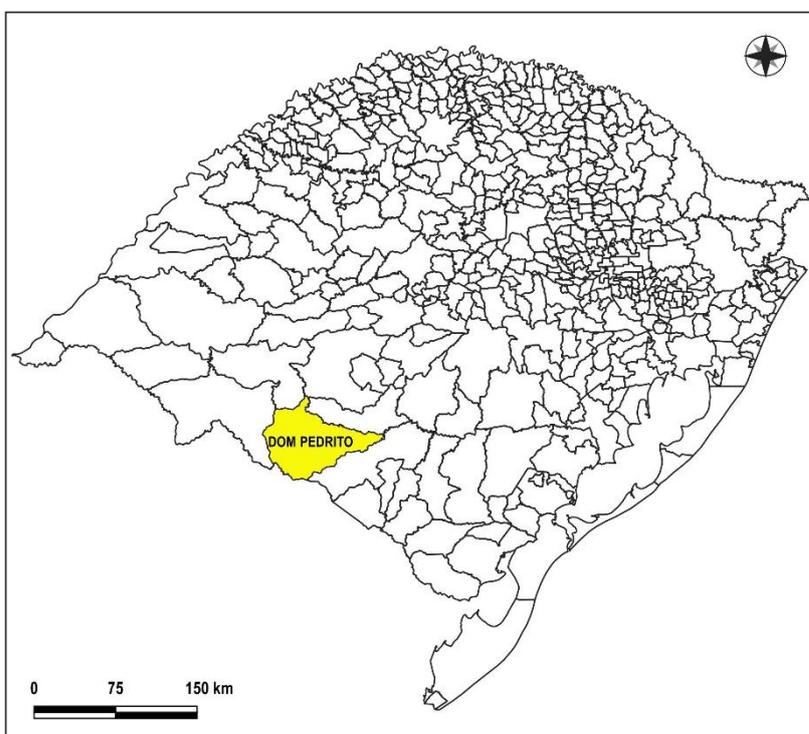
ambiente rizosférico (JETIYANON, 2015). Portanto, os MSP são importantes para a produção agrícola sustentável, melhoria da fertilidade do solo.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL

O trabalho foi realizado na safra de verão de 2021/2022, no município de Dom Pedrito, Estado do Rio Grande do Sul (Figura 1), em uma área comercial da Estância Guatambu destinada ao cultivo de grãos em sistema de semeadura direta, sob pivô central, com 35 hectares, sendo utilizado deste 5.7 hectares para implantação do ensaio nas coordenadas centrais 30°56'18.54" de latitude Sul e 54°45'29.96" de longitude Oeste.

Figura 9 – Mapa de localização do município de Dom Pedrito-RS no Estado do Rio Grande do Sul.



A cobertura do solo quando da semeadura encontrava-se com resteva de azevém (*Lolium multiflorum*). O tipo de solo da região é um Planossolo Háplico Eutrófico (SANTOS et al., 2011), com textura do solo da área de estudo caracterizado por Lamb (2012) como Franco Siltoso, com valores médios de 25% de argila, 21% de areia e 54% de silte.

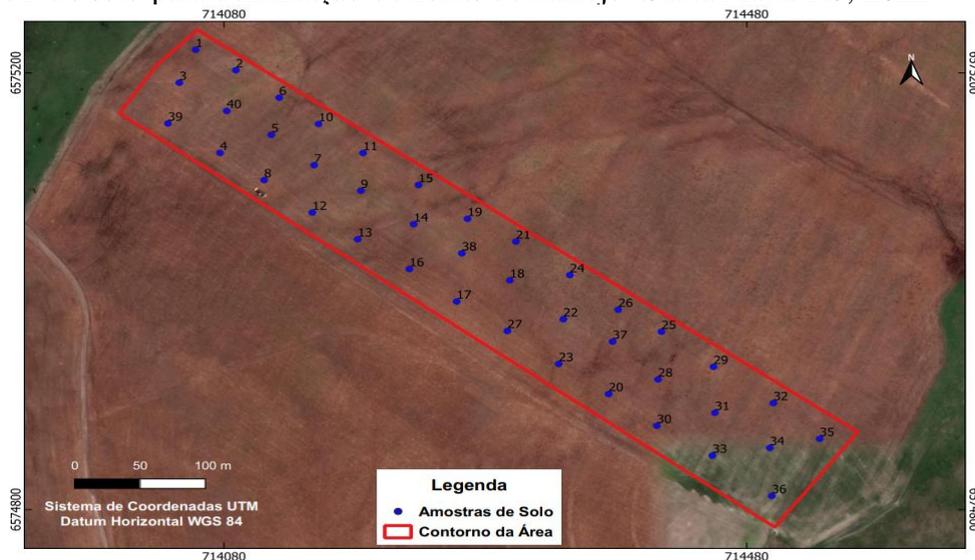
A análise dos teores médios de nutrientes no solo, na camada 0-20 cm, apresentou os seguintes resultados: Argila: 24%; pH em Água: 5,8; índice SMP: 6,1; fósforo: 14,7 mg dm³; potássio: 118 mg dm³; matéria orgânica: 2,1%; alumínio trocável: 0,00 cmol dm³; cálcio: 5,9 cmol dm³; magnésio: 1,7 cmol dm³; H+Al: 3,9 cmol dm³; CTC pH7: 11,8 cmol dm³; saturação de bases: 67%.

Pela classificação de Köppen Geiger o clima é do tipo (Cfa). De acordo com a organização Climate Data (2022) a temperatura média do município é de 18,5 °C e a pluviosidade média anual é de 1313 mm. Para o período de realização do trabalho a estação metereológica da Estância Guatambu coletou uma precipitação total de 472 mm, sendo que houve o complemento de 120 mm via pivô central.

4.2 AMOSTRAGEM, MODELAGEM DA DEPENDÊNCIA ESPACIAL E DEFINIÇÃO DE ZONAS DE MANEJO

A mensuração do teor de P no solo foi estabelecida uma malha amostral regular composta por 40 pontos (Figura 2), utilizando para geração da malha amostral o software QGIS, versão 3.16.11-Hannover o qual determinou os locais em que seriam coletadas as amostras.

Figura 10 - Polígono da área de estudos e pontos amostrais utilizados como base na mensuração do teor de P do solo para delimitação de zonas de manejo. Santa Maria-RS, 2022.



A área é caracterizada como plantio direto em implantação e desta forma as amostras foram coletadas com auxílio de pá de corte na camada de 0-20 cm, conforme preconiza a COMISSÃO...(2016), sendo o número de subamostras igual a 5 (cinco) adquiridas em um raio de 10 metros do ponto central, acondicionadas em sacos plásticos e enviadas ao laboratório de análise de solos da Universidade Federal de Santa Maria para determinação do teor de P em mg dm³.

A dependência espacial foi avaliada pelo ajuste do semivariograma, pressupondo a estacionaridade da hipótese intrínseca, definida pela Equação 1, realizada utilizando o programa computacional QGIS, através de seu plugin Smart Map, desenvolvido por Pereira et al. (2022).

$$\hat{\gamma}(\mathbf{h}) = \frac{1}{2N(\mathbf{h})} \sum_{i=1}^{N(\mathbf{h})} [z(\mathbf{u}_i) - z(\mathbf{u}_i + \mathbf{h})]^2$$

Equação 1

Em que:

- $N(\mathbf{h})$ representa o número de pares de valores medidos, $Z(x_i)$ e $Z(x_i + h)$, separados por uma determinada distância (h).
- Os valores de Z podem ser qualquer um dos parâmetros estudados, enquanto os valores de x_i e $x_i + h$ são definidos de acordo com as posições dos pontos amostrais no campo.

A dependência espacial do teor de P no solo foi medida pelo índice proposto por Cambardella et al. (1994). Também o plugin Smart Map disponibiliza o índice global de Moran para interpretar a correlação espacial dos dados anterior ao ajuste do semivariograma. Se o índice for igual a zero, não existe autocorrelação espacial, caso contrário, existe autocorrelação espacial. Se for positivo significa que as regiões vizinhas possuem valores semelhantes, e negativo implica que as regiões vizinhas tendem a ter valores diferentes. Quanto mais próximo de um, mais forte é a autocorrelação espacial (WALLER; GOTWAY, 2004).

O modelo foi selecionado pela validação cruzada, através da análise do coeficiente de determinação (quanto mais próximo de 1, mais precisas são as estimativas), erro padrão de predição (quanto menor, mais precisas são as estimativas) e intercepto da reta (quanto mais próximo de zero, mais precisas são as estimativas). A interpolação foi realizada utilizando o método da krigagem ordinária ainda com auxílio do plugin Smart Map (PEREIRA et al. 2022), sendo que a predição dos valores em locais não amostrados, foi realizado pela utilização dos 16 vizinhos próximos e um raio de busca igual ao alcance encontrado no semivariograma.

Para definição de zonas de manejo o plugin Smart Map utiliza o algoritmo de classificação Fuzzy k-means na análise de agrupamento dos dados e geração das classes. O número de zonas de manejo ideal é definido em função do Índice de Performance Fuzzy (FPI) que estima o grau da separação das zonas e da Entropia da Partição Modificada (MPE) que estima a desorganização criada pelo número de zonas estabelecidas. Os índices FPI e NCE reportam valores entre 0 e 1, sendo que o número ideal de zonas de manejo é definido pelos menores valores dos índices (BOTTEGA, 2014).

4.3 IMPLANTAÇÃO DO ENSAIO E PRÁTICAS DE MANEJO EMPREGADAS

A semeadura da cultura da soja foi realizada ao final do mês de outubro de 2021, utilizando-se de semeadora/adubadora contendo 17 linhas espaçadas 50 centímetros. A cultivar

utilizada foi a BMX Zeus Ipro em densidade de 18 sementes m^{-1} , sendo inoculadas visando a fixação biológica de nitrogênio com 2 (duas) gramas por quilo de sementes de *Bradyrhizobium japonicum* via turfa diretamente no compartimento de sementes da semeadora.

O inoculante utilizado como solubilizar de fósforo possuía em sua descrição as cepas B119 (*Bacillus megaterium*) e B2084 (*Bacillus subtilis*) com 4×10^9 células viáveis por mililitros (ml^{-1}) de produto, o mesmo foi aplicado via jato dirigido no sulco de semeadura. A dose de produto comercial utilizado foi $200 ml^{-1}$ por hectare em uma vazão de calda de 20 litros ha^{-1} . A fonte mineral solúvel foi aplicada no sulco de semeadura em dose de $80 kg^{-1}$ de pentóxido de difosfato (P_2O_5) via fonte mineral. A dose de P_2O_5 utilizada seguiu o proposto por Mumbach et al. (2021) visando elevar em $5 mg dm^{-3}$ o teor médio inicial de P no solo. O autor cita $16 kg ha^{-1}$ de P_2O_5 para elevação de $1 mg dm^3$ de P no solo, considerando teor de argila de 21 a 40 % e nível de P no solo médio.

Não houve unidade experimental com mistura entre solubilizador e fertilizante, sendo que as parcelas em que foram aplicados o solubilizador foi fechado o mecanismo dosador de fertilizante e nas parcelas com utilização do fertilizante, o jato dirigido era suprimido.

O manejo fitossanitário da cultura constou de duas aplicações fungicidas composta por $300 ml^{-1}$ de produto comercial por hectare dos princípios ativos fluxapiraxade + piraclostrobina e $800 ml^{-1}$ por hectare de epoxiconazol+ fluxapiraxade + piraclostrobina, além de um aplicação inseticida composta por $30 ml^{-1}$ hectare de produto comercial com princípio ativo bifentrina.

O delineamento experimental empregado foi de blocos ao acaso em esquema fatorial 2 x 3 e 4 repetições, o fator A foi composto pelas fontes para disponibilizar P (testemunha, solubilizador e fertilizante químico) e o fator B composto pelas zonas de manejo categorizadas em zona de maior disponibilidade e menor disponibilidade de P no solo, totalizando 24 parcelas experimentais. Cada parcela experimental foi formada por 68 linhas de semeadura (34 m) por 50 metros de comprimento totalizando 1700 metros quadrados cada repetição.

4.4 COLETA DE DADOS E ANÁLISES ESTATÍSTICAS

4.4.1 Análise Foliar do Teor de Fósforo

Por ocasião do estágio R1 (início do florescimento) segundo a classificação de Fehr e Caviness (1977) foram coletadas em sacos de papel, aleatoriamente em cada repetição uma amostra, composta por 50 trifólios. As folhas diagnósticos (Figura 3) foram as folhas trifoliolodas recém-maduras, com pecíolo, correspondentes à terceira ou quarta folha a partir

do ápice da haste principal e envio a laboratório de análise de tecido vegetal para mensuração do teor de P em g kg^{-1} de Matéria Seca.

Figura 11 – Amostra de tecido vegetal composta pelo trifólio de soja coletado para mensuração do teor foliar de P em g kg^{-1} de Matéria Seca.



4.4.2 Produtividade em kg ha^{-1}

A colheita dos grãos foi realizada por colhedora com plataforma de 9.75 metros, sendo colhido todo centro de cada parcela, com a medição individual do comprimento da parcela colhida para mensuração da área em (m^2) (Figura 4).

Figura 12 – Máquina agrícola (A), colheita (B), visão da parcela colhida (C), descarregamento (D), “bag” para coleta de grãos (E) pesagem (F) e separação de amostras (G).



Após a colheita de cada repetição os grãos eram descarregados em “bag” com capacidade para 500 kg⁻¹, retirada uma amostra por repetição para contagem de impureza e umidade e a massa de grãos pesada com balança digital suspensa marca Premier (Figura 4), com posterior desconto da impureza e ajuste da umidade para 13% e extrapolação da massa da área colhida para kg ha⁻¹.

4.4.3 Massa de Mil Grãos (MMG)

Após a colheita de cada repetição no processo de descarregamento ao “bag” foi coletado em saco plástico cerca de 3 kg de sementes (Figura 5), com identificação para posterior contagem do MMG. Para contagem foram separadas 10 alíquotas de mil sementes pesados em balança digital com precisão de 0.01 g⁻¹, calculada a média da amostragem e corrigida a umidade para 13%, com os dados expressos em gramas.

Figura 13 – Amostra de grãos de soja coletados durante a colheita para mensuração do massa de mil grãos (MMG). Santa Maria-RS.2022.



4.4.4 Análise do Teor de P do solo após colheita

Após a finalização da colheita, com auxílio de pá de corte (COMISSÃO...(2016) foi realizada amostragem de solo na camada 0-20 cm, com a limpeza superficial dos resíduos de colheita e coleta de 5 subamostras dentro de cada repetição, as quais foram destorroadas, retiradas impurezas, homogeneizadas e retirada uma amostra composta de 500 g para envio a laboratório de análise de solo e determinação do teor de P em mg dm⁻³.

4.4.5 Análise do Teor de P no Grão

Os grãos coletados para análise de MMG, após sua mensuração, foram encaminhados a laboratório de análise de tecido vegetal para determinação do teor de P no grão, expresso em percentagem (%) por quilo de Matéria Seca.

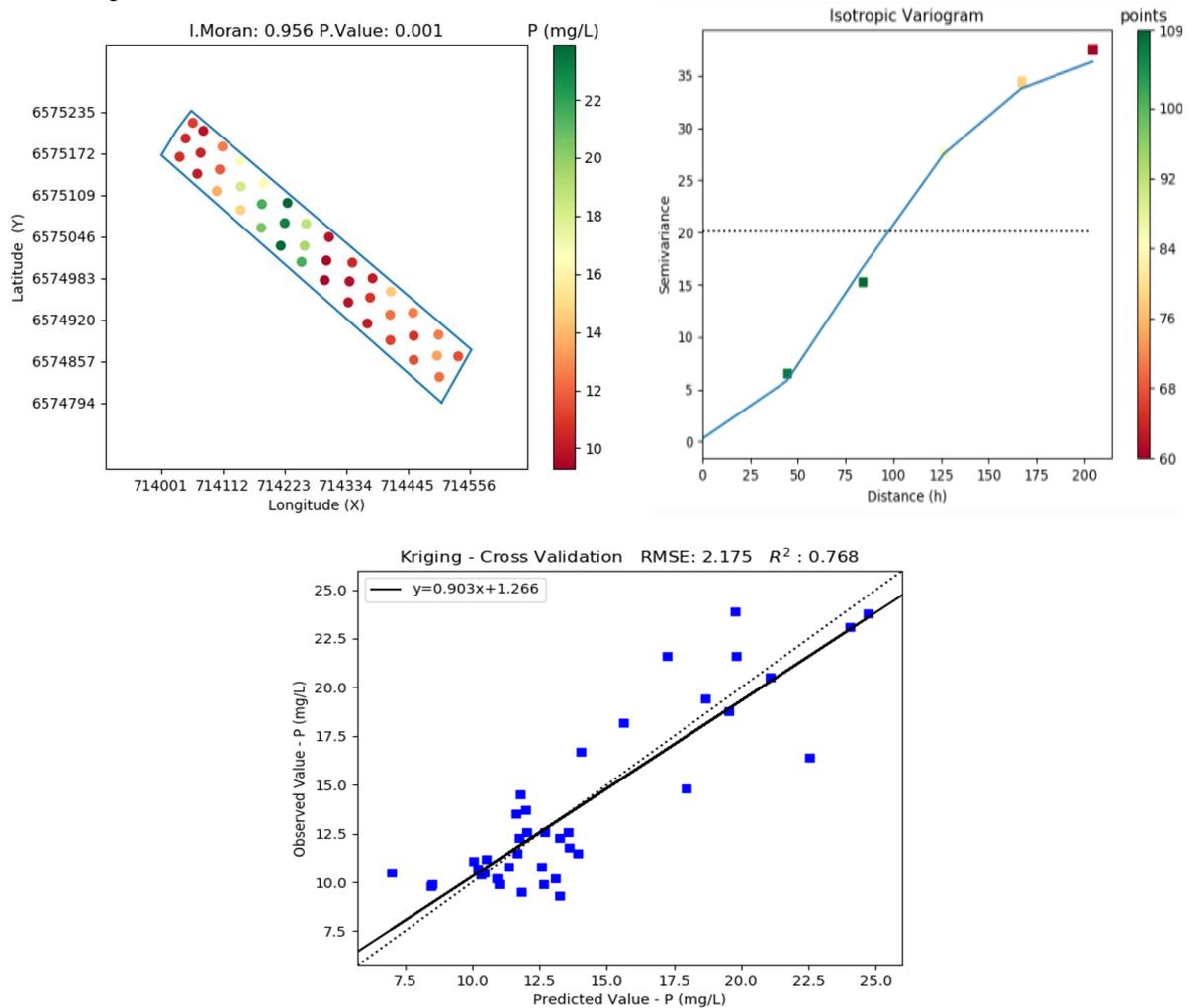
4.4.6 Análises Estatísticas

As análises estatísticas foram realizadas no software Sisvar (FERREIRA, 2004). Inicialmente foi realizado o teste de normalidade de Shapiro-Wilk (W ; $p < 0,05$), para verificação da normalidade de dados. Os dados que apresentaram distribuição normal, foram então submetidos ao teste de médias pelo teste de Tukey ($p < 0,05$) e confeccionados gráficos de barras para exposição dos resultados no programa operacional Microsoft Excel.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

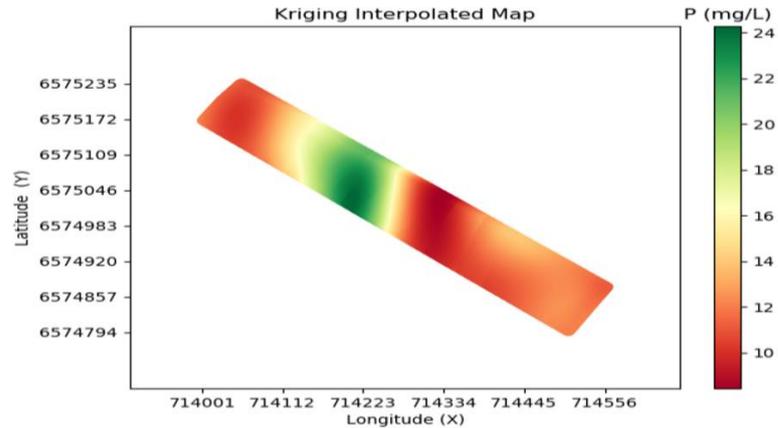
Na Figura 6 é apresentado o resultado da modelagem do variograma e validação cruzada. O modelo que obteve melhor ajuste foi o gaussiano, com efeito pepita (0,296), patamar (37,542), alcance (191,03 m), coeficiente de determinação (0,994) e RMSE (4,175). O índice de dependência espacial foi classificado com representativo de forte dependência (IDE: 0,99).

Figura 14 - Modelagem do semivariograma e validação cruzada no plugin Smart Map do software QGIS.



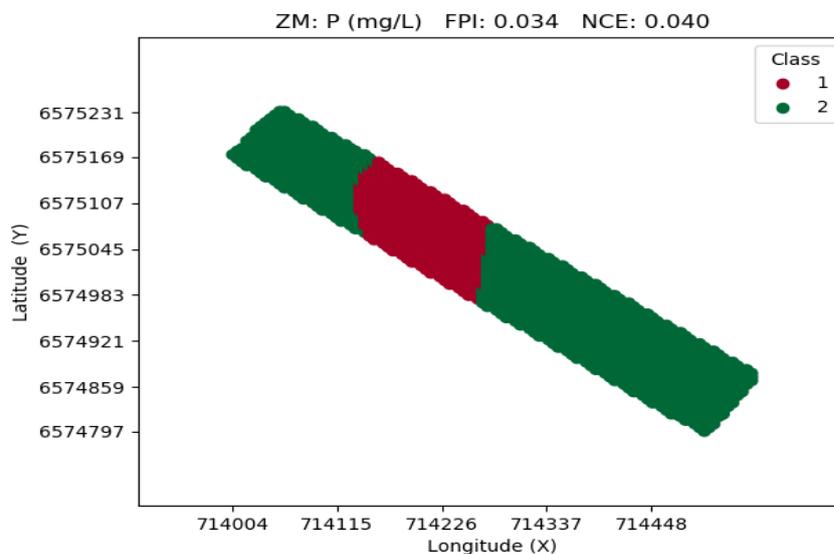
Após a detecção da dependência espacial, efetuou-se a produção do mapa temático do teor de P do solo, apresentado na Figura 7, em que se consegue visualizar a oscilação da variabilidade espacial do teor de P na área de estudo, com amplitude de 8.43 a 24.65 mg dm³ de P.

Figura 15 – Mapa temático do teor de fósforo no solo através de krigagem ordinária no plugin Smart Map do software QGIS 3.16.



Na Figura 8 é apresentado o mapa de zonas de manejo, caracterizado pela delimitação de 2 (duas) classes, representativas de maior disponibilidade (ZM 1) e menor disponibilidade de fósforo (ZM 2). O agrupamento dos dados em duas ZM resultou em FPI (*Fuzziness Performace Índex*) de 0,034 e NCE (*Normalized Classification Entropy*) de 0,040, indicando que a delimitação da área em duas ZM foi adequada, pois de acordo com Song et al. (2009) o número de zonas de manejo ótimo é obtido quando ambos os índices são minimizados. Os valores de P preditos que caracterizaram a zona de maior disponibilidade obtiveram média de 20,89 mg dm⁻³, já as zonas de menor disponibilidade apresentaram média de 10,2 mg dm³, de acordo com a COMISSÃO...(2016) para a argila média de 24% a zona de maior disponibilidade é interpretada como teor alto e a de menor disponibilidade como teor médio.

Figura 16 – Zonas de manejo delimitadas através do mapa do teor de P oriunda da krigagem ordinária no plugin Smart Map do software QGIS.



A análise de variância dos dados médios coletados no estudo estão dispostos na Tabela 1. Verifica-se um baixo coeficiente de variação amostral (CV). Carvalho et al. (2003) evidenciaram que o CV indica o grau de precisão do experimento. Pimentel-Gomes (1985) classifica CV menor que 10% como baixo ou alta precisão experimental. Os dados amostrais se enquadram nesta classe de CV sendo o teor de P no solo com maior (9,75%) e a produtividade de grãos o menor (2,90%), refletindo a boa precisão experimental.

Tabela 2 – Resumo da análise de variância com os quadrados médios para as variáveis massa de mil grãos (MMG), teor de fósforo no solo (P Solo), teor de fósforo na folha (P Folha), teor de fósforo no grão (P Grão) e produtividade em kg ha⁻¹ (Prod).

Causa de Variação	GL	MMG	P Solo	P Folha	P Grão	Prod.
Fator A (Fontes)	2	285,79*	36,99*	0,018 ^{ns}	0,0017*	15.1591,6*
Fator B (Zonas)	1	37,5 ^{ns}	160,68*	0,0009 ^{ns}	0,0048*	92.5228,69*
A x B	2	5,38 ^{ns}	11,14*	0,0034 ^{ns}	0,0008 ^{ns}	82.861,29*
Bloco	3	15,28 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,014 ^{ns}	0,00012 ^{ns}	5.978,38 ^{ns}
Erro	15	42,41 ^{ns}	2,19 ^{ns}	0,039 ^{ns}	0,0003 ^{ns}	13.248,49 ^{ns}
CV (%)	-	3,47	9,75	7,96	3,27	2,90
Média	-	187,92	15,17	2,47	0,52	3.964,33
Shapiro Wilk (p<0.05)	-	0,64 ^{ns}	0,14 ^{ns}	0,57 ^{ns}	0,23 ^{ns}	0,065 ^{ns}

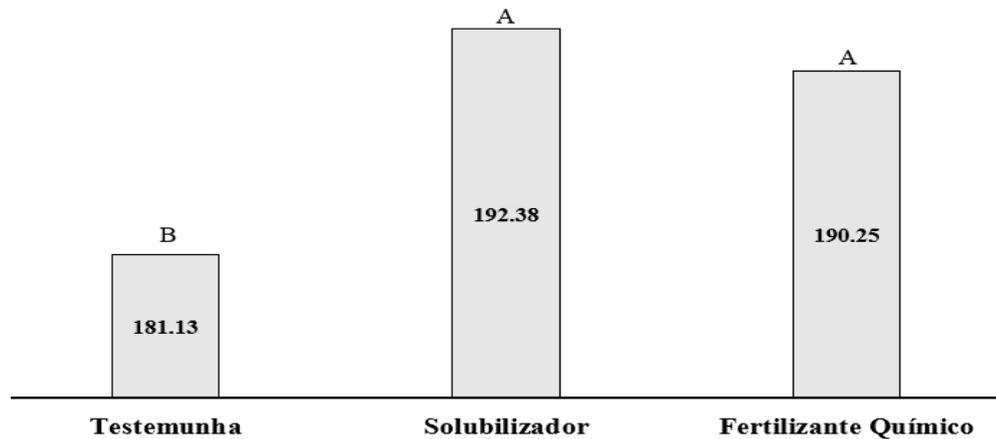
*diferença significativa das médias (p <0,05) pelo Teste de Tukey a 5% de erro. ^{ns}- não significativo

Os dados também atenderam a curva de distribuição normal pelo teste de Shapiro Wilk com valores não significativos (p>0,05), portanto não sendo necessário sua transformação para uso em testes de médias. Lamb (2008) citaram que a distribuição normal apresenta propriedades que a tornam especiais para uso em teste de médias da estatística clássica como: simetria, moda, média e mediana próximas, com possibilidade de ser representada e quantificada a partir dos valores da média e desvio padrão.

De acordo com a análise de variância não houve diferenças significativas para P na folha para nenhum dos fatores, bem como para sua interação, com média geral de 2,47 g kg⁻¹ matéria seca (MS). O MMG houve efeito significativo apenas para o fator A (fontes de disponibilidade), o P no grão foi significativo para o fator A (fontes) e B (zonas) isolados. O P no solo foi significativo para a interação (A X B) e para os fatores A e B isolados, assim como ocorreu para a produtividade de grãos.

A Figura 9 demonstra o efeito significativo do fator A (fontes de disponibilidade de P) para a MMG de soja. A testemunha pesou 5,84% e 4,79% inferior ao solubilizador de P e a fonte química de P, respectivamente. Os dados encontrados corroboram com Melo; Mendonça (2019) que o P é importante nutriente para o metabolismo energético das plantas, quando não disponível a cultura em nível adequado, interfere negativamente no desenvolvimento vegetal de forma irreversível. A não adição de P comprometeu o peso de grãos da soja. A fonte química e o solubilizador de P não diferiram produzindo grãos com MMG semelhantes. Possivelmente, o solubilizador liberou P contribuindo para melhoria nutricional a qual proporcionou a mesma MMG que a aplicação de 80 kg de P_2O_5 via fonte mineral.

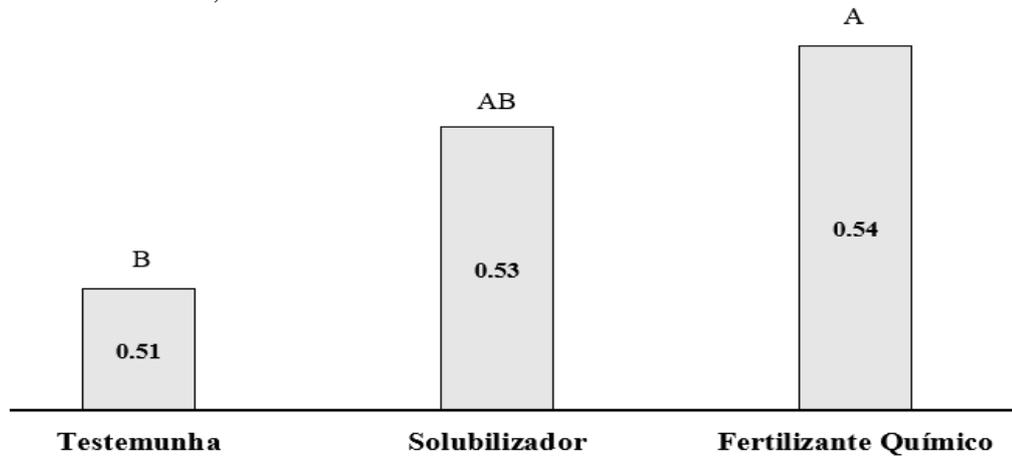
Figura 17 – Efeito das fontes de disponibilidade de P na massa de mil grãos (gramas) da cultura da soja. Santa Maria-RS, 2022.



*Letras maiúsculas iguais “**não diferem**” entre os tratamentos pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

O teor de P no grão (Figura 10) assim como para o MMG foi influenciado pelas fontes empregadas com intuito de disponibilizar P à cultura da soja. O teor de P no grão da testemunha foi 5,55% inferior à fonte mineral, que por sua vez não diferiu do solubilizador de P. O solubilizador de P e a testemunha foram iguais estatisticamente devido à diferença mínima significativa (DMS) ser igual a 0,022% da matéria seca. Este DMS fez com que a fonte química, estatisticamente, acumulasse maior teor de P no grão que a testemunha por 0,008% de matéria seca.

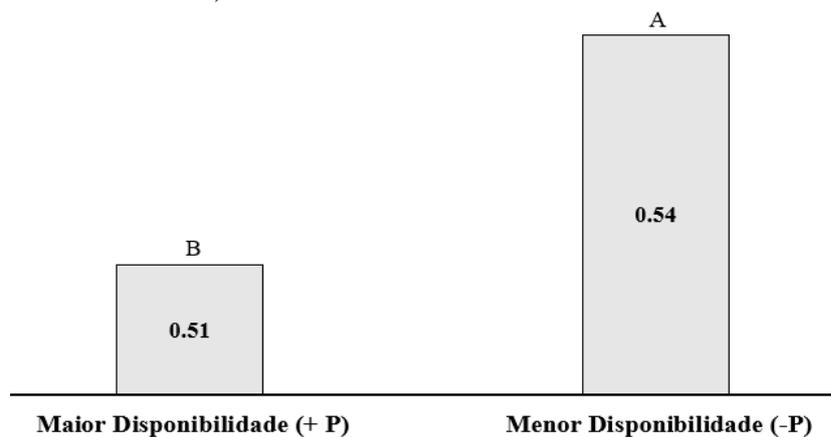
Figura 18 – Teor de P no grão (%) de soja em diferentes fontes para disponibilizar fósforo à cultura. Santa Maria-RS, 2022.



*Letras maiúsculas iguais “**não diferem**” entre os tratamentos pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

O teor de P no grão (%) representada na Figura 11, demonstra que a zona de menor disponibilidade de P acumulou maior teor de P no grão. Este fato pode ser explicado pelo trabalho de Strock et al. (2018) os quais relatam que devido à disponibilidade limitada e movimento lento de P no solo, uma das estratégias utilizadas pela planta é aumentar o sistema radicular e assim o volume de solo explorado, o que pode ter influenciado uma maior busca de P pelas plantas nas zonas de menor disponibilidade e consequente maior translocação ao grão.

Figura 19 – Teor de P no grão (%) de soja em diferentes zonas de disponibilidade de fósforo (P) a cultura. Santa Maria - RS, 2022.



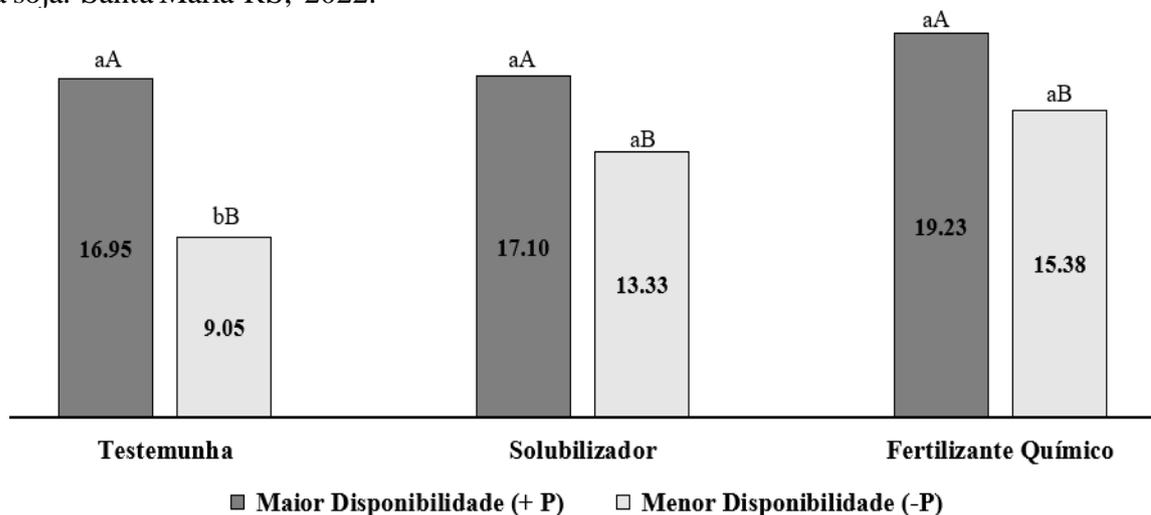
*Letras maiúsculas iguais “**não diferem**” entre as zonas de manejo pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Linck (2007) cita que sob baixo P a planta prioriza o crescimento primário (alongamento) sobre o crescimento secundário (espessamento) das raízes. Chu et al. (2018) observaram maior razão raiz:parte aérea em soja como forma de aumentar a aquisição de P.

Verifica-se portanto, uma possível evolução da cultura da soja e criação de mecanismos de tolerância ao menor teor de P no solo. De acordo com Thuynsma et al. (2016) sob deficiência de nutrientes as plantas alocam maiores quantidades de açúcares nos órgãos envolvidos para sua obtenção, como as raízes, aumentando o volume e massa das mesmas. Outro mecanismo é citado por Rose et al. (2016) em que as plantas em zonas de deficiência de P aumentam a eficiência de remobilização e utilização do P interno sendo esta mais elevada do que plantas sem deficiência de P. Por fim, Chu et al. (2018) relatam uma modificação da anatomia foliar de plantas de soja em sob déficit de P, geralmente menores e mais grossas, esse fato leva a menor perda de água ao exterior influenciando na redistribuição de metabólitos na planta.

Houve interação entre os fatores para o teor de P no solo demonstrados na Figura 12. Todos os manejos empregados para disponibilizar P à cultura da soja foram superiores na zona de maior disponibilidade em relação à zona de menor disponibilidade. O desdobramento dos manejos dentro de cada zona de disponibilidade demonstra que em zonas de maior disponibilidade os manejos não diferiram para o teor de P, evidenciando a importância da delimitação de zonas de disponibilidade para o manejo da adubação fosfatada em soja.

Figura 20 – Desdobramento da interação entre fator A (fontes de disponibilidade de P) e fator B (zonas de disponibilidade de P) para o teor de P no solo (mg dm^{-3}) após a colheita da cultura da soja. Santa Maria-RS, 2022.



*Letras minúsculas iguais “**não diferem**” entre os tratamentos em mesma zona de disponibilidade e maiúsculas iguais “**não diferem**” para o tratamento em zonas de disponibilidade diferentes pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Entretanto, em zona de menor disponibilidade o solubilizador e a fonte química foram maiores que a testemunha sem adição de P, $4,28 \text{ mg dm}^{-3}$ e $6,33 \text{ mg dm}^{-3}$, respectivamente. Os dados sugerem que o solubilizador de P utilizado em zona de menor disponibilidade de P pode

umentar a labilidade do elemento à cultura da soja. Já em zonas de maior disponibilidade de P o uso tanto de solubilizador quanto da fonte mineral não trouxe resultados em relação a não adição do nutriente.

Desta forma, através do teor de P encontrado no solo das diferentes zonas de disponibilidade, fica evidente a importância da agricultura de precisão (AP) na definição de zonas de manejo para o teor de P no solo, evitando o desperdício de insumos. Barbieri et al (2008) descreveram que a AP propõe estratégias de gerenciamento da aplicação localizada de insumos, corrigindo apenas pontos específicos de anormalidade. Ferguson et al., (2002) também declararam que o tratamento de talhões como uniforme acaba justamente por aplicar nutrientes em demasia onde os teores estão altos e insuficiente em teores de baixo teor nutricional.

Ao avaliar o efeito isolado das fontes de disponibilidade para o teor de P no solo (Figura 13), verifica-se que a fonte mineral disponibilizou maiores teores de P no solo, 24,85% mais que a testemunha e 12,08 % mais que o solubilizador de P. O teor médio predito de P_2O_5 no solo anterior ao trabalho apresentava $15,54 \text{ mg dm}^{-3}$, desta forma a fonte química aumentou em $1,76 \text{ mg dm}^{-3}$ com a adição de $40 \text{ mg dm}^{-3} P_2O_5$ via fertilizante, ou seja, 4,4% do teor adicionado inicialmente ainda ficou disponível após a colheita, sem considerar o exportado pela cultura.

Figura 21 – Efeito das fontes de disponibilidade de P no teor de P no solo (mg dm^{-3}) após a colheita da cultura da soja. Santa Maria-RS, 2022.



*Letras maiúsculas iguais “**não diferem**” entre os tratamentos pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

De acordo com Santos et al (2008) a dinâmica do P no solo está associada ao ambiente que controla a atividade microbiana e às propriedades físico-químicas e mineralógicas do solo. Os autores ainda citam que em solos cujo processo de intemperismo é menor, o P ainda se

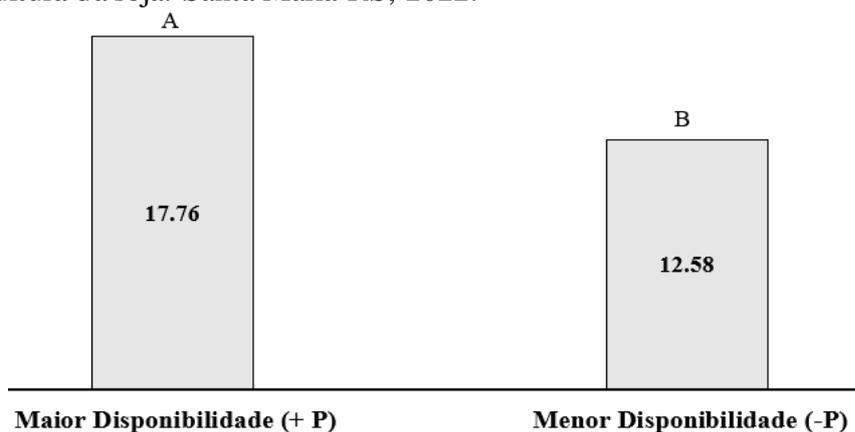
encontra em frações de minerais primários, na forma orgânica e mineral, com energia de ligação mais fraca para adsorção.

O solo da região atende esta afirmação por se tratar de Planossolo e explica o fato do P solúvel via fonte mineral suprir a necessidade da cultura da soja e restar 34,6 kg ha de P_2O_5 detectado na análise química. Ou seja, o P adicionado não foi imobilizado em sua totalidade.

Embora, o P restante no solo após a colheita seja maior na fonte química, o solubilizador conseguiu diferir da testemunha em 14,53%, o que demonstra o potencial das bactérias em solubilizar o P e promissor na redução de custos da adubação fosfatada. Ainda, considerando o teor médio de P na área de estudo anterior ao experimento ($15,54 \text{ mg dm}^{-3}$) nota-se que mesmo havendo a exportação do nutriente pela cultura, segundo Novais; Smyth; Nunes (2007) a soja incorpora na biomassa em torno de 20 kg ha^{-1} , a fonte química conseguiu aumentar o teor de P no solo e o solubilizador manteve o teor inicial, sendo portanto duas formas de disponibilizar P a cultura da soja. Onde a relação custo-benefício tende a favor do inoculante devido aos custos da fonte fosfatada solúvel.

O efeito isolado das zonas de disponibilidade de P (Figura 14) demonstra que em zona de maior disponibilidade o teor final de P foi $5,18 \text{ mg dm}^{-3}$ maior que a zona de menor disponibilidade. Este cenário ratifica o intuito inicial do trabalho em que a adoção de zonas de manejo poderia ser um diferencial para a gestão da alocação e manejo da adubação fosfatada.

Figura 22 – Efeito das zonas de disponibilidade de P para o teor de P no solo (mg dm^3) após a colheita da cultura da soja. Santa Maria-RS, 2022.



*Letras maiúsculas iguais “**não diferem**” entre as zonas de manejo pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Rodrigues Junior et al. (2011) descreveram que as zonas de manejo são regiões delimitadas dentro do mesmo talhão onde com a captura da variabilidade do fator que limita a produção agrícola, pode-se utilizar de doses de insumos direcionadas em cada região específica.

A Figura 14 corrobora esta afirmação, onde a zona de maior disponibilidade poderá em um ano agrícola posterior receber menos P que a zona de menor disponibilidade, outrossim como as zonas foram delimitadas com amostragem adensada, em futura amostragem para o teor de P poderia se fazer uso de menor número de amostras, com economia de tempo e custo.

Os valores dos teores de P que caracterizaram a zona de maior disponibilidade possuíram $17,76 \text{ mg dm}^{-3}$ de média final está $14,98\%$ inferior a média inicial predita ($20,89 \text{ mg dm}^{-3}$) o que não ocorreu para zona de menor disponibilidade de P, com média inicial predita de $10,2 \text{ mg dm}^{-3}$ e aumento de $18,92\%$ no teor final de P. Há quatro hipóteses para este fato. Primeiro seguindo o citado por Strock et al. (2018) em que em zona de menor disponibilidade de P o sistema radicular é aumentado e o volume de solo explorado é maior. Onde no momento da amostragem final (após a colheita) o teor de P na zona radicular era mais expressivo que o inicial devido a está maior área abrangida pelo sistema radicular.

Segundo fato é que o P é transportado por difusão evidenciada por Costa et al. (2009) e assim melhorada com a umidade de solo. A área experimental foi sob pivô central com complemento da umidade o que pode ter favorecido a liberação do P na zona de menor disponibilidade.

Terceiro, Costa et al. (2010) citaram que o sistema de cultivo anterior favorece o aumento do teor de P no solo, principalmente o uso do azevém (*Lolium multiflorum*) e pastejo animal. Em que o corte do meristema apical da forrageira e quebra da dominância apical, favorece o crescimento e desenvolvimento de raízes em camadas mais profundas do solo, aumentando a porosidade e os teores de P orgânico, aumentando assim os teores de P mesmo em zonas de menor disponibilidade do nutriente. Este cenário é o mesmo do trabalho.

Em quarto, foi relatado por Ham et al (2018) que em menor disponibilidade de P as plantas possuem a capacidade de investir na excreção de substâncias como ácidos orgânicos ao redor do sistema radicular que possuem a capacidade de aumentar a solubilização do P e com isso suprir sua demanda. López-Bucio et al (2000) citam o mesmo que em resposta à deficiência de P as raízes aumentam a exsudação de ácidos orgânicos visando a liberação de P inorgânico.

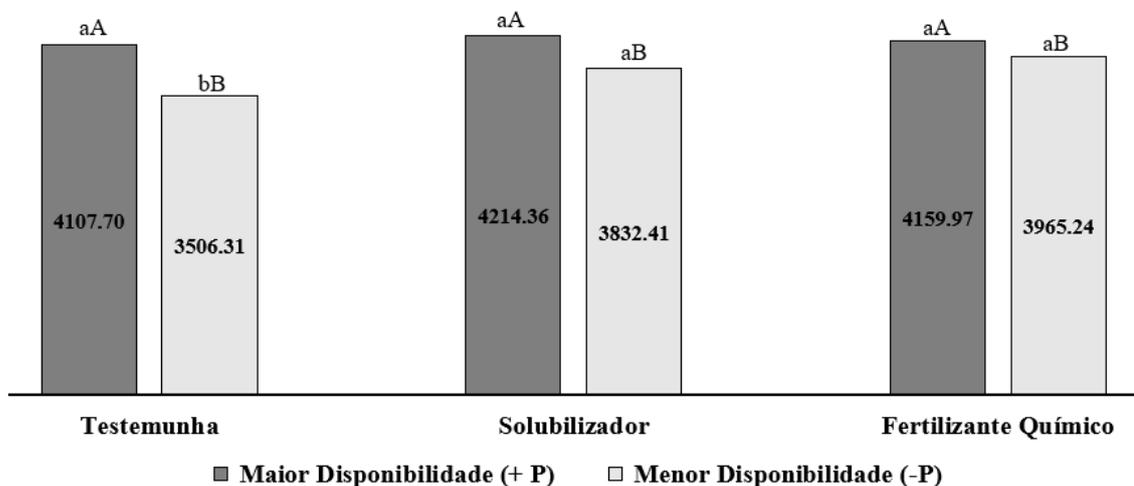
Portanto, pelos valores encontrados na Figura 14, a primeira, terceira e quarta hipóteses são mais convincentes visto que a umidade do solo empregado beneficiaria as duas zonas de disponibilidade de P, enquanto as demais teriam maior efeito para a zona de menor disponibilidade de P.

O desdobramento da interação entre o fator A (fontes de disponibilidade) e fator B (zonas de disponibilidade de P) na produtividade de grãos da cultura da soja (Figura 15)

demonstra assim como para a variável teor de P no solo (mg dm^{-3}) em zona de maior disponibilidade os tratamentos não diferiram para o teor de P. Enquanto, para zona de menor disponibilidade o solubilizador e a fonte química, produziram 8,51% e 11,57% mais grãos que a testemunha sem adição de P, respectivamente.

Assim, a definição de zonas de manejo torna-se ferramenta importante para o manejo de P, visto que sem diferença significativa da testemunha a utilização do solubilizador de P e a fonte química não trouxe benefícios a cultura da soja em zona de maior disponibilidade de P.

Figura 23 – Desdobramento da interação entre fator A (fontes de disponibilidade de P) e fator B (zonas de disponibilidade de P) para a produtividade de grãos de soja (kg ha^{-1}). Santa Maria-RS, 2022.



*Letras minúsculas iguais “**não diferem**” entre os tratamentos em mesma zona de disponibilidade e maiúsculas iguais “**não diferem**” para o tratamento em zonas de disponibilidade diferentes pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

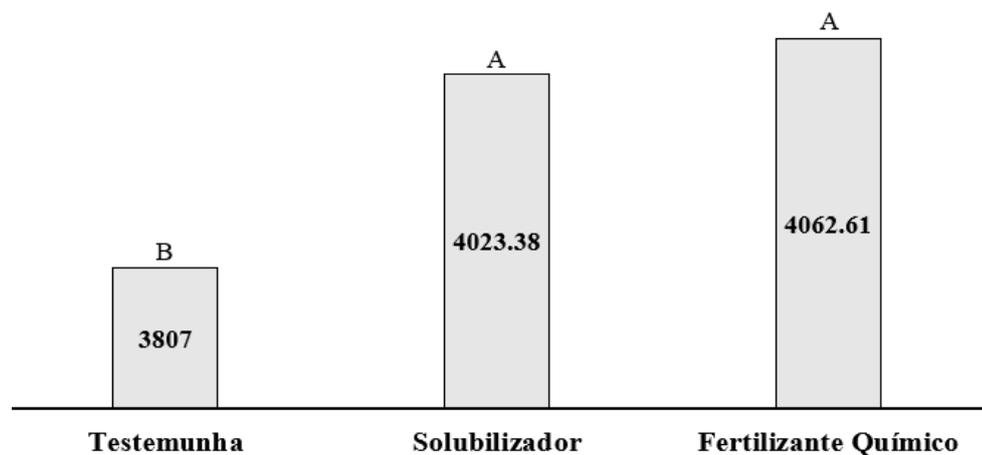
Diferentemente da zona de maior disponibilidade de P, em zona de menor disponibilidade verifica-se o incremento da produtividade para o solubilizador e fonte química em relação a testemunha. Fato interessante quando se pensa no manejo de P e no custo benefício do mesmo, visto que entre solubilizador e fonte química não houve diferença estatística e numericamente se distanciaram em 2,22 sacas de 60 kg. Ao comparar a testemunha e a fonte química os dados corroboram com Batistella Filho et al. (2013) os quais observaram aumento na produtividade de grãos de soja com a adubação fosfatada em condições de solo com menor teor de P.

Ao observar o desdobramento do fator B (zonas de disponibilidade) dentro do fator A (fontes de disponibilidade) verifica-se para todos componentes de manejos empregados uma maior produtividade dentro da zona de maior disponibilidade. Resultado este creditado a

importância do P as culturas agrícolas. O P é participante de diversas reações metabólicas das plantas, presente em moléculas biológicas, incluindo ácidos nucleicos, co-enzimas, fosfoproteínas e fosfolipídios (TIAN et al. 2021 ; TAMBURINI, 2012). Atua na fotossíntese, respiração, armazenamento e transferência de energia, divisão celular e crescimento das células (HAMMOND; WHITE, 2008). E na cultura da soja contribui para a nodulação e fixação biológica do nitrogênio (OLIVEIRA-PAIVA et al., 2021).

Para o efeito isolado do fator A (fontes de disponibilidade) na produtividade de grãos (Figura 16) a testemunha produziu menor quantidade grãos diferindo do solubilizador de P (5,38%) e da fonte química (6,29%) que não diferiram estatisticamente entre si. Numéricamente, a produtividade do solubilizador e a fonte química foram separados por 39,23 kg de grãos, o que demonstra a eficiência das bactérias utilizadas para cultura da soja, sugerindo poder substituir a fonte mineral, nas condições do estudo.

Figura 24 – Efeito das fontes de disponibilidade de P na produtividade de grãos de soja (kg ha⁻¹). Santa Maria-RS, 2022.



*Letras maiúsculas iguais “**não diferem**” entre os tratamentos pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Araújo et al. (2021) em seu trabalho com *B. subtilis*, uma das bactérias do solubilizador testado, relatou que a aplicação do mesmo modificou a partição de assimilados na soja, levando ao aumento da superfície radicular e da biomassa da raiz. Este resultado pode explicar o motivo da produtividade da soja semelhante entre o solubilizador e a fonte química, pela melhoria da aquisição de P causado pelos MSP.

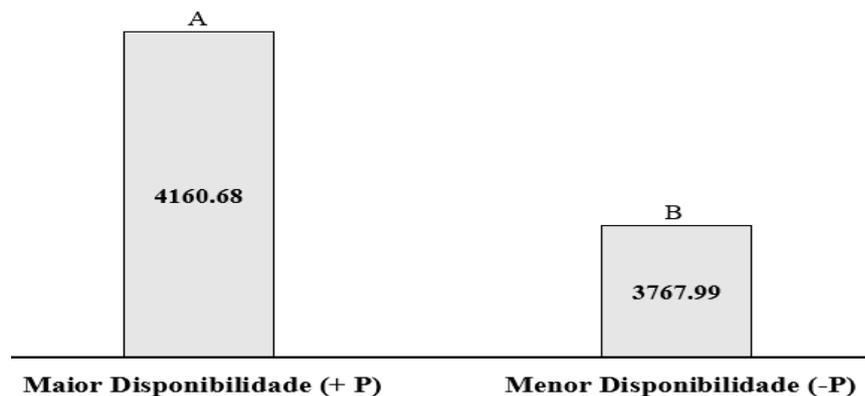
Outra vantagem do uso dos MSP é a capacidade de disponibilizar o fósforo complexado a Ca, Fe e Al no solo pela liberação de ácidos orgânicos (OLIVEIRA et al., 2009), além de mineralizar o fósforo orgânico e resíduos culturais pela liberação de enzimas ao (MANDER et al., 2012). Oliveira-Paiva et al. (2021) utilizando as mesmas bactérias B119 (*Bacillus*

megaterium) e B2084 (*Bacillus subtilis*) do trabalho, conduziram a cultura da soja em 415 locais na safra 2020/2021, sendo que em todos a produtividade de grãos foi maior nas áreas inoculadas via semente em relação a testemunha.

A produtividade com uso da fonte química de P era esperada devido a complementação do P, via adubação. De acordo com Santos et al. (2008) a adição de P solúvel ocasiona acúmulo de P inorgânico com alta disponibilidade no solo o que reflete em melhoria da nutrição da cultura.

Em relação ao efeito do fator B (zonas de manejo da disponibilidade de P) na produtividade (Figura 17) a zona de maior disponibilidade produziu 9,44% maior massa de grãos. A privação de P inibe crescimento as plantas, levando a irreversibilidade de danos ao funcionamento das mesmas (VENEKLAAS et al., 2012).

Figura 25 – Efeito das zonas de disponibilidade de P na produtividade de grãos de soja (kg ha⁻¹). Santa Maria-RS, 2022.



*Letras maiúsculas iguais “**não diferem**” entre as zonas de manejo pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Após o consumo das reservas de P das sementes o crescimento e desenvolvimento depende da absorção de P pelas raízes do solo, o que coincide com a máxima disponibilidade de P do solo oriundo do fertilizante (VENEKLAAS et al., 2012). Ainda, Ceretta et al. (2007) observam em relação aos fertilizantes fosfatados que devido suas reações com os constituintes do solo a melhor forma de aproveitamento da adubação é na linha de semeadura.

Desta forma, tanto a fonte química quanto o solubilizador foram depositados no sulco de semeadura e este procedimento pode ter maximizado a absorção de P pelas plantas de soja. Uma pela menor adsorção do P ao solo pela fonte mineral solúvel e também uma maior proximidade das bactérias as raízes das plantas de soja agindo em mutualismo com a cultura. Os MSP favorecendo-se dos exsudatos radiculares e a planta absorvendo o P dessorvido pelos MSP.

6 CONCLUSÃO

A MMG da soja foi incrementada em 5,84% com o uso de solubilizador e em 4,79% com fornecimento de P via fonte mineral.

O teor de P no grãos foi 5,55% maior após fornecimento de P via fonte mineral, quando comparado com a testemunha, não diferindo dos teores observados para com solubilizador.

O fornecimento de P via fonte mineral resultou em maior teor de P no solo após a colheita da soja.

A produtividade foi aumentada pelo fornecimento de P, em 6,29 % via fonte mineral e 5,38% via solubilizador, comparada à testemunha sem utilização de P.

Zonas de manejo de maior disponibilidade de P apresentaram produtividade 9,44% maior se comparada com ZM de menor disponibilidade.

O teor de P nos grãos aumentou quando cultivada em ZM de menor disponibilidade de P.

O teor final de P no solo (mg dm^{-3}) aumentou em 18,92% do teor médio inicial em zona de menor disponibilidade de P, inferindo em melhoria do solo após o experimento.

Não foi observada diferenças na produtividade de soja e no teor de P no solo na ZM de maior disponibilidade de P, independente do tratamento estudado.

A produtividade é responsiva a adição de P em zonas de menor disponibilidade, com aumento de 8,51% via solubilizador e 11,57% via fonte mineral, em relação a não adição do nutriente.

A delimitação de ZM, com base na disponibilidade de P no solo, mostrou-se promissora ferramenta na tomada de decisão quanto ao manejo de P para a cultura da soja, proporcionando incremento na produtividade, no teor de P nos grãos e no solo, além de indicar redução no custo com fornecimento de P, seja via fonte mineral ou solubilizador.

Em talhões com teores médios e altos de P o uso de solubilizador pode substituir a fonte mineral solúvel, não comprometendo os teores de P no solo e a produtividade da cultura da soja.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho trás uma oportunidade de economia de insumos na propriedade rural. Percebeu-se que a produtividade da soja inoculada com solubilizador de fosfato se equivale a adubação química. Cabe salientar que os teores de P no local experimental eram considerados médios (zona de menor disponibilidade) e altos (zona de maior disponibilidade). Assim, duas contribuições diretas aos produtores rurais podem ser enaltecidas:

PRIMEIRA: Frente aos custos elevados de fontes fosfatadas inorgânicas a delimitação de zonas de manejo da disponibilidade do teor de P possibilita uma melhor alocação e aproveitamento da adubação fosfatada e assim reduz o custo de produção. Podendo ser suprimida em zonas em que o teor de P se encontra com teores caracterizados como “ALTOS” na interpretação da análise de solo.

SEGUNDA: Quando os teores de P no solo estiverem acima do limite inferior da classe de disponibilidade “MÉDIA” o uso de solubilizador via sulco de semeadura na dose de 200 ml ha⁻¹ possibilita a manutenção do teor de P no solo após saída da cultura da soja, como também mantém a produtividade igual ao uso do fertilizante mineral, sendo uma alternativa econômica e sustentável.

Em uma análise econômica resumida para a data de 20/08/2022, considerando o preço da saca de 60 kg de soja do dia em Dom Pedrito (R\$177.50), a cotação á vista de solubilizador (R\$ 950 litro) e da fonte fosfatada (R\$ 4.340 ton), além de considerar as doses utilizadas no trabalho de 200 ml ha⁻¹ produto comercial e 80 kg de P₂O₅ e as produtividades médias da testemunha (63.45 sc), solubilizador (67.05 sc) e fertilizante (67.71 sc).

Verifica-se maior receita bruta em prol da utilização do solubilizador, sendo está (R\$ 449 ha⁻¹) maior em relação a não aplicação do solubilizador e (R\$517.46 ha⁻¹) em relação ao uso do fertilizante químico. E portanto, em talhões em que a interpretação dos teores de P no solo estejam médios e altos é uma forma de economia de recursos e melhoria da rentabilidade ao produtor rural.

REFERÊNCIAS

- ABDEL-GHANY, T. et al. Solubilization of inorganic phosphate by rhizospheric fungi isolated from soil cultivated with *Sorghum bicolor* L. **Bioresources**, v. 14, n. 3, p. 5521-5532, 2019. Disponível em: https://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_14_3_5521_Abdel_Ghany_Rhizospheric_Fungi/7152 Acesso em: 21/06/2022.
- ABREU, C. S. et al. Maize endophytic bacteria as mineral phosphate solubilizers. **Genetics and Molecular Research**, v. 16, n. 1, p. 1-13, 2017. DOI: <https://doi.org/10.4238/gmr16019294>.
- ALEWELL, C. et al. Global phosphorus shortage will be aggravated by soil erosion. **Nat. Commun**, v.11, artigo. 4546, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18326-7>
- ALORI, E. T.; GLICK, B. R.; BABALOLA, O. O. Microbial Phosphorus Solubilization and Its Potential for Use in Sustainable Agriculture. **Front. Microbiol.**, v. 8, artigo nº 971, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00971>
- AMADO, T. J. C. et al. Atributos químicos e físicos de Latossolos e sua relação com os rendimentos de milho e feijão irrigados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, n.4, p.831-843, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000400008>
- AMADO, T. J. C. et al. Variabilidade espacial e temporal da produtividade de culturas sob sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 8, p. 1101-1110, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2007000800006>
- ANDRADE, S. F. de.; MENDONÇA-SANTOS, M. de. L. Predição da fertilidade do solo do polo agrícola do Rio de Janeiro por meio de modelagem solo x paisagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p.1386-1395, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900037>
- ANGHINONI, I.; BISSANI, C.A. **Fósforo e adubos fosfatados**. In: BISSANI, C.A.; GIANELLO, C.; TEDESCO, M.J.; CAMARGO, F.A.O. (Org.). Fertilidade dos solo e Manejo da Adubação de Culturas. 1 ed. Porto Alegre, Genesis, v.1, 2004. p.117-138.
- ANTONINI, R. C. et al. Adoção e uso da agricultura de precisão na região das missões do Rio Grande do Sul, **HOLOS**, Ano 34, v. 04. p.p. 106-121, 2018. DOI: <https://doi.org/10.15628/holos.2018.6297>
- ARAÚJO, F. F. et al. *Bacillus subtilis* changes the root architecture of soybean grown on nutrient-poor substrate. **Rhizosphere**, v. 18, article 100348, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2021.100348>
- AZZIZ, G. et al. Abundance, diversity and prospecting of culturable phosphate solubilizing bacteria on soils under crop–pasture rotations in a no-tillage regime in Uruguay. **Applied Soil Ecology**, v. 61, p. 320-326, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2011.10.004>

BABALOLA, O. O.; GLICK, B. R. Indigenous African agriculture and plant associated microbes: current practice and future transgenic prospects. **Scientific Research and Essays**, v. 7, p. 2431–2439, 2012. DOI: <https://doi.org/10.5897/SRE11.1714>

BALIAH, N. T.; PANDIARAJAN, G.; KUMAR, B. Isolation, identification and characterization of phosphate solubilizing bacteria from different crop soils of Srivilliputtur Taluk, Virudhunagar District, Tamil Nadu. **Tropical Ecology**, v. 57, n. 3, p. 465-474, 2016. Disponível em http://216.10.241.130/pdf/open/PDF_57_3/8%20Baliah,%20Pandiarajan&Kumar-f.pdf Acesso em: 11/06/2022

BARBIERI, D. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos químicos de um Argissolo para aplicação de insumos à taxa variável em diferentes formas de relevo. **Engenharia Agrícola**, v. 28, p. 645-653, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162008000400004>

BARBIERI, R. S. et al. Distribuição espacial de atributos do solo na região de El Oro, Equador. **Colloquium Agrariae**, v. 16, n. 4, p.46-60, 2020. Disponível em <https://journal.unoeste.br/index.php/ca/article/view/2973> Acesso em: 15/06/2022.

BARBOSA, D. P. et al. Delineation of homogeneous zones based on geostatistical models robust to outliers. **Revista Caatinga**, v. 32, n. 2, p.472-481, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-21252019v32n220rc>

BATISTA, F. C. et al. **Potencial de microrganismos rizosféricos e endofíticos de milho em solubilizar o fosfato de ferro e produzir sideróforos**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2018. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 166). Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/183975/1/bol-166.pdf> Acesso em:10/05/2022

BATISTELLA FILHO, F. et al. Adubação com fósforo 50 e potássio para produção e qualidade de sementes de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 7, p.783-790, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2013000700011>

BEHERA, B. C. Phosphate solubilization and acid phosphatase activity of *Serratia* sp. isolated from mangrove soil of Mahanadi river delta, Odisha, India. **Journal of Genetic Engineering and Biotechnology**, v. 15, p.169-178, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jgeb.2017.01.003>

BERNARDI, A. C. de C. et al. Ferramentas de agricultura de precisão como auxílio ao manejo da fertilidade do solo. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 32, n. 1/2, p. 211-227, 2015. Disponível em <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/1037525/1/CadCiTecnol32p2112172015.pdf> Acesso em: 29/05/2022

BONONI, L. et al. Phosphorus-solubilizing *Trichoderma* spp. from Amazon soils improve soybean plant growth. **Scientific Reports**, v. 10, artigo nº 2858, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59793-8>

BORGES, L. C. et al. Agricultura de precisão: ferramenta de gestão na rentabilidade e produtividade de grãos. **Scientific Electronic Archives**, v. 15, n.3, 2022. DOI: <https://doi.org/10.36560/15320221520>

BOTTEGA, Eduardo Leonel. Utilização de Zonas de Manejo para a Produção de Soja no Cerrado Brasileiro. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2014, 78f. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/handle/123456789/780> Acesso em: 06/06/2022

BÜNEMANN, E. K. Assessment of gross and net mineralization rates of soil organic phosphorus. A review. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 89, p. 82-98, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.06.026>

CAMBARDELLA, C. A. et al. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. **Soil Science Society America Journal**, v.58, n.5, p.1501-1511, 1994. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x>

CARVALHO, C. G. P. de et al. Proposta de classificação dos coeficientes de variação em relação à produtividade e altura da planta de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, n. 2, pp. 187-193, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2003000200004>

CHAGAS, A. F. et al. Capacidade de solubilização de fosfatos e eficiência simbiótica de rizóbios isolados de solos da Amazônia. **Acta Scientiarum**, v. 32, n. 2, p.359-366, 2010. DOI: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v32i2.3185>

CHU, S. et al. Physiological and proteomics analyses reveal low-phosphorus stress affected the regulation of photosynthesis in soybean. **International Journal of Molecular Sciences**, v.19, n. 6, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms19061688>

CLIMATE DATA - CLIMA DOM PEDRITO (BRASIL). Disponível em: <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/rio-grande-do-sul/dom-pedrito-43773/#climate-graph> Acesso em: 10/06/2022.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - CQFS-RS/SC - Comissão de Química e Fertilidade do Solo - RS/SC. **Manual de calagem e adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2016. 376 p.

CORDELL, D.; DRANGERT, J. O.; WHITE, S. The story of phosphorus: global food security and food for thought. **Glob Environ Change**, v. 19, p. 292–305, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.10.009>

COSTA, J. P. V. et al. Difusão de fósforo em solos de Alagoas influenciada por fontes do elemento e pela umidade. **Revista Caatinga**, v.22, p. 229-235, 2009. Disponível em: <https://periodicos.ufersa.edu.br/caatinga/article/view/1227> Acesso em: 10/06/2022.

COSTA, S.E.V.G.A. Patterns in phosphorus and corn root distribution and yield in long-term tillage systems with fertilizer application. **Soil and Tillage Research**, v.109, n.1, p. 41- 49, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2010.04.003>

COUTINHO, F. P. et al. Solubilization of phosphates in vitro by *Aspergillus* spp. and *Penicillium* spp. **Ecological Engineering**, v.42, p. 85–89, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.02.002>

DE OLIVEIRA M. G. et al. Mechanisms of phosphate solubilization by fungal isolates when exposed to different P sources. **Annals of Microbiology**, v. 64, p.239-249, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13213-013-0656-3>

DE OLIVEIRA, L. E. Z. Et al. Dynamics of residual phosphorus forms under different tillage systems in a Brazilian Oxisol. **Geoderma**, v.367, p. 114-254, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114254>

DELALIBERA, H. C. et al. Management zones in agriculture according to the soil and landscape variables. **Engenharia Agrícola**, v. 32, n. 6, p. 1197-1204, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162012000600021>

DESMIDT, E. et al. Global phosphorus scarcity and full-scale P-recovery techniques: a review. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 45, n. 4, p. 336-384, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1080/10643389.2013.866531>

DIACONO, M. et al. Spatial and temporal variability of wheat grain yield and quality in a Mediterranean environment: A multivariate geostatistical approach. **Field Crops Research**, v. 131, p. 49-62, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.03.004>

DUARTE, C. F. D. et al. Capim-piatã adubado com diferentes fontes de fósforo. **Revista Investigação**, v.15, n.14, p.58-63, 2016. DOI: <https://doi.org/10.26843/investigacao.v15i4.1198>

FEHR, W.R.; CAVINESS, C.E. STAGES OF SOYBEAN DEVELOPMENT. Ames: Iowa State University, (**Special Report**, 80), 12p. 1977.

FERGUSON, R. B. et al. Site-specific nitrogen management of irrigated maize: Yield and soil residual nitrate effects. **Soil Fertility & Plant Nutrition**, v. 66, p.544–553, 2002. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2002.5440>

FU, Q.; WANG, Z.; QIUXIANG, J. Delineating soil nutrient management zones based on fuzzy clustering optimized by PSO. **Mathematical and Computer Modelling**, v.51, p. 1299-1305, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2009.10.034>

GOLDSTEIN, A. H. et al. Evidence for mutualism between a plant growing in a phosphate-limiting desert environment and a mineral phosphate solubilizing (MPS) rhizobacterium. **FEMS Microbiology Ecology**, v.30, n.4, p. 295-300, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.1999.tb00657.x>

GOMES, E. A. et al. Microrganismos Promotores do Crescimento de Planta: Microrganismos Promotores do Crescimento de Plantas (MPCP). Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas-MG, 2016. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/161283/1/doc-208.pdf>. Acesso em: 13 mar. 2022.

HAM, B. K. et al. Insights into plant phosphate sensing and signaling. **Current Opinion in Biotechnology**, v.49, p.1–9, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2017.07.005>

HAMMOND, J. P.; WHITE, P. J. Sucrose transport in the phloem: integrating root responses to phosphorus starvation. **Journal of Experimental Botany**, v. 59, n. 1, p. 93-109, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/erm221>.

HEINRICHS, R.; SOARES FILHO, C. V. **Adubação e manejo de pastagens**. Birigui: Boreal, 2014. p. 180.

JETIYANON, K. Multiple mechanisms of *Enterobacter asburiaestrain* RS83 for plant growth enhancement. **Songklanakarin Journal of Science and Technology**, v. 37, n. 1, p. 29-36, 2015. Disponível em: <https://www.thaiscience.info/journals/Article/SONG/10968369.pdf>
Acesso em: 05/07/2022

KALAYU, G. Phosphate solubilizing microorganisms: promising approach as biofertilizers. **International Journal of Agronomy**, article ID 4917256, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/4917256>

KHAN, M. S.; ZAIDI, A.; WANI, P. A. Role of phosphate-solubilizing microorganisms in sustainable agriculture — A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 27, p. 29–43, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1051/agro:2006011>

KISHORE, N.; PINDI, P. K.; REDDY, S. R. Phosphate-solubilizing microorganisms: a critical review. **Plant Biology and Biotechnology**, p.307-333, 2015. DOI: https://doi.org/10.1007/978-81-322-2286-6_12

KUMAR, A.; KUMAR, A.; PATEL, H. Role of microbes in phosphorus availability and acquisition by plants. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**, v. 7, n. 5, p. 1344–1347, 2018. DOI: <https://doi.org/10.20546/jcmmas.2018.705.161>

LAMB, C. R. Statistical briefing: the normal distribution. **Vet Radiol Ultrasound**, v.49, n.5, p.492-3, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1740-8261.2008.00415.x>

LEE, K-K et al. Mechanisms of Phosphate Solubilization by PSB (Phosphate-solubilizing Bacteria) in Soil. **Korean Journal of Soil Science and Fertilizer**, v .45, p.169–76, 2012.

LI, L. et al. Evaluation and improvement of phosphate solubilization by na isolated bacterium *Pantoea agglomerans* ZB. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 36, n. 27, p. 1-14, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11274-019-2744-4>

LIAN, T. et al. High aluminum stress drives different rhizosphere soil enzyme activities and bacterial community structure between aluminum-tolerant and aluminum-sensitive soybean genotypes. **Plant Soil**, v.440, p. 409-425, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04089-8>

LIM, B. L. et al. Distribution and diversity of phytate-mineralizing bacteria. **The ISME Journal**, v. 1, p. 321–330, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1038/ismej.2007.40>

LÓPEZ-BUCIO, J. et al. Organic acid metabolism in plants: from adaptive physiology to transgenic varieties for cultivation in extreme soils. **Plant Science**, v.160, p.1-13, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0168-9452\(00\)00347-2](https://doi.org/10.1016/s0168-9452(00)00347-2)

MACHADO, J. et al. Agricultura de Precisão: Programas Tecnológicos no Brasil. **Revista Geama**. n. 4, p. 23-30, 2018. Disponível em: <http://www.journals.ufrpe.br/index.php/geama/article/view/1939> Acesso em: 05/06/2022.

MAHDI, S.S. et al. Phosphorus availability issue- its fixation and role of phosphate solubilizing bacteria in phosphate solubilization. **Research Journal of Agricultural Sciences**, New York, v. 2, n. 1, p. 174–179, 2011.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006. 638p.

MANDER, C. et al. Incidence and diversity of phosphate solubilizing bacteria are linked to phosphorus status in grassland soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 44, p. 93-101, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.09.009>

MELO, C.A. D. et al. Acúmulo de macronutrientes por plantas daninhas e de milho cultivadas em convivência em solo com diferentes manejos de fertilidade. **Semina: Ciências Agrárias**, v.36, n.2, p.669-682, 2015. Disponível em [https://www.bvs-vet.org.br/vetindex/periodicos/semina-ciencias-agrarias/36-\(2015\)-2/acumulo-de-macronutrientes-por-plantas-daninhas-e-de-milho-cultivadas/](https://www.bvs-vet.org.br/vetindex/periodicos/semina-ciencias-agrarias/36-(2015)-2/acumulo-de-macronutrientes-por-plantas-daninhas-e-de-milho-cultivadas/) Acesso em: 10/06/2022.

MELO, F. M.; MENDONÇA, L. P. C. Avaliação da disponibilidade de fósforo em solo argiloso com diferentes teores de matéria orgânica. **Humanidades & Tecnologia**, v. 18, n. 1, p.52-67, 2019. Disponível em http://revistas.icesp.br/index.php/FINOM_Humanidade_Tecnologia/article/view/794 Acesso em: 06/06/2022.

MENDES, G.O. et al. Mechanisms of phosphate solubilization by fungal isolates when exposed to different P sources. **Annals of Microbiology**, v. 64, p. 239-49, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13213-013-0656-3>

MENDES, I. D. C.; DOS REIS JUNIOR, F. B. Microrganismos e disponibilidade de fósforo (P) nos solos: uma análise crítica. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2003. 24 p. (Documentos, 85). Disponível em <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/568171/1/doc85.pdf> Acesso em: 20/06/2022

MIRANDA, A. C. C.; VERISSIMO, A. M.; CEOLIN, A. C. Agricultura de precisão: Um mapeamento da base da Scielo. **Revista Gestão. Org.** v. 15, Edição Especial, p. 129-137, 2017. DOI: <https://doi.org/10.21714/1679-18272017v15Ed.p129-137>

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. 2. Ed. Lavras: UFLA, 2006. 368p.

MUMBACH, G.L. et al. Refining phosphorus fertilizer recommendations based on buffering capacity of soils from southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 45, e0200113. 2021. DOI: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcS20200113>

MUNIR, I.; BANO, A.; FAISAL, M. Impact of phosphate solubilizing bacteria on wheat (*Triticum aestivum*) in the presence of pesticides. **Brazilian Journal of Biology**, v. 79, n. 1, p. 29-37, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/1519-6984.172213>

NESME, T., METSON, G. S., BENNETT, E. M. Global P flows through agricultural trade. **Global Environmental Change**, v. 50, p.133-141, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.04.004>

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J.; NUNES, F. N. Fósforo. In: NOVAIS, R. F. et al. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.471-537
NOVAIS, R.F.; SMYTH, T. J. **Fósforo no solo e planta em condições tropicais**. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399p.

NUSSAUME, L. et al.. Phosphate Import in Plants: Focus on the PHT1 Transporters. **Frontiers in Plant Science**, v. 2, p. 83, 2011.

OLIVEIRA, C. A. et al. Phosphate solubilizing microorganisms isolated from rhizosphere of maize cultivated in an oxisol of the Brazilian Cerrado biome. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 25, p. 1-6, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.01.012>

OLIVEIRA-PAIVA, C. A. et al. **Validação da recomendação para o uso do inoculante BiomaPhos® (*Bacillus subtilis* CNPMS B2084 e *Bacillus megaterium* CNPMS B119) na cultura de soja**. Sete Lagoas, MG: Embrapa Milho e Sorgo, 2021. 18p. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica, 279). Disponível em <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/228039/1/CIRC-TEC-279-Validacao-recomendacao-BiomaPhos-cultura-soja.pdf> Acesso em: 20/06/2022.

OWEN, D. et al. Use of commercial bioinoculants to increase agricultural production through improved phosphorus acquisition. **Applied Soil Ecology**, v. 86, p. 41-54, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2014.09.012>

PAIVA, C. A. O. et al. **Inoculantes de microrganismos promotores de crescimento em milho: transferindo a diversidade do laboratório para o campo**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2018. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 227).Disponível em <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1099689/1/doc227.pdf> Acesso em: 25/06/2022

PATINO-TORRES, C. O. ;SANCLEMENTE-REYES, O. E. Los microorganismos solubilizadores de fósforo (MSF): una alternativa biotecnológica para una agricultura sostenible. **Entramado**. vol.10, n.2, p.288-297, 2014. Disponível em: <http://www.scielo.org.co/pdf/entra/v10n2/v10n2a18.pdf> Acesso em: 02/07/2022.

PAVINATO, P. S. et al. Revealing soil legacy phosphorus to promote sustainable agriculture in Brazil. **Scientific Reports**, v. 10, article 15615, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72302-1>

PEREIRA, G.W. et al. Soil mapping for precision agriculture using support vector machines combined with inverse distance weighting. **Precision Agriculture**, v.23, p.1189-1204, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11119-022-09880-9>

- PIMENTEL-GOMES, F. **Curso de estatística experimental**. São Paulo: Esalq, 1985. 467 p.
- RASUL, M. et al. Glucose dehydrogenase gene containing phosphobacteria for biofortification of Phosphorus with growth promotion of rice. **Microbiological Research**, v. 223, p.1–12, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micres.2019.03.004>
- RAWAT, P. et al. Phosphate-Solubilizing Microorganisms: Mechanism and Their Role in Phosphate Solubilization and Uptake. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v.21, p.49-68, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00342-7>
- RICHARDSON, A. E. et al. Plant and microbial strategies to improve the phosphorus efficiency of agriculture. **Plant Soil**, v.349, p.121-156, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-011-0950-4>
- RICHARDSON, A. E.; SIMPSON, R. J. Soil microorganisms mediating phosphorus availability update on microbial phosphorus. **Plant Physiology**, v.156, n.3, p.989-996, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.111.175448>
- RODRIGUES JUNIOR, F. A. et al. Geração de zonas de manejo para cafeicultura empregando-se sensor SPAD e análise foliar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.8, p.778–787, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000800003>
- RODRIGUES, M. S.; CORA, J. E. Management zones using fuzzy clustering based on spatial-temporal variability of soil and corn yield. **Engenharia Agrícola**, v.35, n.3, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v35n3p470-483/2015>
- ROSALEN, D. L. et al. GPS receivers for georeferencing of spatial variability of soil attributes. **Engenharia Agrícola**, v. 31, n. 6, p. 1162-1169, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162011000600013>
- ROSE, T. J., et al. Screening for internal phosphorus utilisation efficiency: comparison of genotypes at equal shoot P content is critical. **Plant and Soil**, v. 401, n.1–2, p.79-91, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2565-7>
- SANTOS, D. R. dos.; GATIBONI, L.; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, v. 38, n. 2 , pp. 576-586, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782008000200049>
- SANTOS, H. G. dos. et al. **O novo mapa de solos do Brasil**: legenda atualizada. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 67 p. (Embrapa Solos. Documentos, 130) Escala 1:5.000.000. Disponível em: <https://doi.org/10.26843/investigacao.v15i4.1198>
em:http://geoinfo.cnps.embrapa.br/layers/geonode%3ABrasil_solos_5m_20201104#more
Acesso em: 20/05/2022.
- SATYAPRAKASH, M. et al. A review on phosphorous and phosphate solubilising bacteria and their role in plant nutrition. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**, v. 6, p. 2133–2144, 2017. DOI: <https://doi.org/10.20546/ijemas.2017.604.251>

SERRANO, J. M. et al. Medição e mapeamento da condutividade elétrica aparente do solo em pastagens. **Revista Ciências Agrárias**, v.33, n.2, p.5-14, 2010. DOI: <https://doi.org/10.19084/rca.15867>

SHARMA, S. B. et al. Phosphate solubilizing microbes: sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. **SpringerPlus**, v.2, n.587, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-587>

SHEN, J et al. Phosphorus Dynamics: From Soil to Plant. **Plant Physiology**, v. 156, n. 3, , p. 997-1005, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.111.175232>

SILVA, V. R. et al. Variabilidade espacial das características químicas do solo e produtividade de milho em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 6, p. 1013-1020, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000600005>

SIQUEIRA, J. O.; ANDRADE, A. T.; FAQUIM, V. O papel dos microrganismos na disponibilização e aquisição de fósforo pelas plantas. In: SIMPÓSIO SOBRE FÓSFORO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 2003. Piracicaba. **Anais ... Piracicaba: POTAFOS**, 2004. p. 158.

SMITH, F.W. The phosphate uptake mechanism. **Plant and Soil**, v. 245, n. 1, p. 105-114, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1020660023284>

SONG, X.; WANG, J.; HUANG, W.; LIU, L.; YAN, G.; PU, R. The delineation of agricultural management zones with high resolution remotely sensed data. **Precision Agriculture**, v.10, p.471-487, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11119-009-9108-2>

SOUZA JÚNIOR, R. F. de S. et al. Frações de fósforo inorgânico do solo e suas correlações com o fósforo quantificado por extratores e pelo milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 1, p. 159-169, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000100017>

TAMBURINI, F. et al. Oxygen isotopes unravel the role of microorganisms in phosphate cycling in soils. **Environmental Science & Technology**, v. 46, 5956–5962, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1021/es300311h>

THUYNSMA, R. et al. The effects of limiting phosphate on photosynthesis and growth of *Lotus japonicus*. **South African Journal of Botany**, 104, 244–248, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2016.03.001>

TIAN, J. et al. Roles of Phosphate Solubilizing Microorganisms from Managing Soil Phosphorus Deficiency to Mediating Biogeochemical P Cycle. **Biology**, v.10, p.158, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/biology10020158>

VALENTE, D. S. M. et al. Definition of management zones in coffee production fields based on apparent soil electrical conductivity. **Scientia Agricola**, v. 69, p. 173-179, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162012000300001>

VAN KAUWENBERGH, S. J. **World phosphate rock reserves and resources**. Muscle Shoals: IFDC, 2010. 48 p.

VANCE, C. P. Symbiotic nitrogen fixation and phosphorus acquisition. Plant nutrition in a world of declining renewable resources. **Plant Physiology**, v. 127,n.2, p. 390-307, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.010331>

VASSILEV, N. et al. Biotechnological tools for enhancing microbial solubilization of insoluble inorganic phosphates. **Geomicrobiology Journal**, v.31, n.9, p.751-763, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1080/01490451.2013.822615>

VENEKLAAS, E. J. et al. Opportunities for improving phosphorus-use efficiency in crop plants. **New Phytologist**, v.195,p. 306-320, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04190.x>

WAKELIN, S. A. et al. Phosphate solubilization by *Pencillium* spp. closely associated with wheat roots. **Biology and Fertility of Soils**, v. 40, p.p. 36-43, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00374-004-0750-6>

WALLER, L. A.; GOTWAY, C. A. **Applied spatial statistics for public health data**. New Jersey: J. Wiley, 2004. 519p.

WIENS, J. T, et al. Potential phosphorus export in snowmelt as influenced by fertilizer placement method in the Canadian Prairies. **Journal of Environmental Quality**, v. 48, p.p.586–593, 2019. DOI: <https://doi.org/10.2134/jeq2018.07.0276>

ZAIDI, A.; KHAN, M.; AHMED, M. O. M. Plant growth promotion by phosphate solubilizing bacteria. **Acta Microbiologica et Immunologica Hungarica**, v.56, n. 3, p. 263–284, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1556/AMicr.56.2009.3.6>

ZERAATPISHEH, M. et al. Spatial variability of soil quality within management zones: Homogeneity and purity of delineated zones. **CATENA**, v. 209, Part 1, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105835>

ZHU, F. et al. Isolation and characterization of a phosphate solubilizing halophilic bacterium *Kushneria* sp. YCWA18 from Daqiao Saltern on the coast of yellow sea of China. **Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine**, artigo ID 615032, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1155/2011/615032>