

Avaliação da interação entre bactérias solubilizadoras de fosfato e micorrizas, com doses de fósforo na cultura do milho

Evaluation of the interaction between phosphate-solubilizing bacteria and mycorrhizae, with phosphorus doses in corn crop

Eliete de Fátima Ferreira da Rosa¹(ORCID 0000-0001-9131-8118), **Cristiano do Nascimento Andrade**¹(ORCID 0009-0001-4269-689X), **Steffani da Luz**¹(ORCID 0000-0001-5442-7403), **Jéssica Fernandes Kaseker**²(ORCID 0000-0001-5487-7439), **Marcos André Nohatto**¹(ORCID 0000-0002-0820-330X), **Lenoir Eder Teixeira Nagel**¹(ORCID 0000-0002-9671-9022)

¹Instituto Federal Catarinense, Santa Rosa do Sul, SC, Brasil.

²Pesquisadora Autônoma, Três Cachoeiras, RS, Brasil. *Autor para correspondência: jessikaseker@gmail.com

Submissão: 05/07/2023 | Aceite: 02/11/2023

RESUMO

As doses de P a serem aplicadas na cultura do milho comumente são elevadas em decorrência do baixo aproveitamento do nutriente devido a sua adsorção ao solo. O objetivo deste trabalho foi avaliar o uso das bactérias solubilizadoras de fosfato *Bacillus megaterium* e *Bacillus subtilis*, e do fungo micorrízico *Rhizophagus intraradices*, bem como a interação entre eles, e a possibilidade de redução da adubação fosfatada na cultura do milho. O delineamento experimental foi em blocos casualizados, em um fatorial 4x3, sendo o fator A composto por diferentes microrganismos solubilizadores de P (micorrizas e BiomaPhos®) e o fator B composto por diferentes doses de P (100, 75 e 50% da dose recomendada). A redução das doses de P, sem o uso de inoculantes, resultou em menor área foliar e teor de clorofila, porém não foi observado efeito significativo na altura das plantas. Nos componentes de rendimento número de grãos por espiga, peso de mil grãos e produtividade, a inoculação compensou a redução das doses. A aplicação de 50% da dose de P juntamente com a inoculação das bactérias foi o tratamento com maior margem bruta, sendo viável para a redução da adubação mineral.

PALAVRAS-CHAVE: análise econômica; *Bacillus megaterium*; *Bacillus subtilis*; *Rhizophagus intraradices*; *Zea mays*.

ABSTRACT

The doses of P to be applied in the corn crop are commonly high due to the low use of the nutrient due to its adsorption to the soil. The objective of this study was to evaluate the use of the phosphate solubilizing bacteria *Bacillus megaterium* and *Bacillus subtilis*, and the mycorrhizal fungus *Rhizophagus intraradices*, as well as the interaction between them, and the possibility of reducing phosphate fertilization in corn. The experimental design was in randomized blocks, in a 4x3 factorial, with factor A composed of different P-solubilizing microorganisms (mycorrhizae and BiomaPhos®) and factor B composed of different doses of P (100, 75 and 50% of the recommended dose). The reduction of P doses, without the use of inoculants, resulted in lower leaf area and chlorophyll content, but no significant effect was observed on plant height. In the yield components number of grains per cob, thousand grain weight and yield, inoculation compensated for the dose reduction. The application of 50% of the P dose together with the inoculation of bacteria was the treatment with the highest gross margin, being viable for the reduction of mineral fertilization.

KEYWORDS: economic analysis; *Bacillus megaterium*; *Bacillus subtilis*; *Rhizophagus intraradices*; *Zea mays*.

INTRODUÇÃO

A cultura do milho é um dos principais produtos agrícolas mundiais, sendo o Brasil o terceiro maior produtor do grão, com mais de 112 milhões de toneladas produzidas na safra 2021/2022. Embora não esteja entre os principais produtores do país, em Santa Catarina a cultura tem grande importância no desenvolvimento agropecuário, sendo base para produção avícola e suinícola. No entanto, o estado ainda não é autossuficiente em relação à sua demanda, sendo necessária a importação para abastecer as fábricas de ração (EPAGRI 2020, CONAB 2022). Desta forma, ferramentas que propiciem o aumento da produtividade e reduzam o custo de produção são importantes para alavancar a cadeia produtiva do milho no Estado.

Neste sentido, um dos fatores relevantes é a disponibilidade de nutrientes. As plantas de milho possuem alta demanda de nutrientes, especialmente nitrogênio e potássio, e também de fósforo, onde a alta taxa de translocação do nutriente para os grãos e a consequente exportação fazem com que o seu fornecimento via adubação seja essencial (COELHO 2006). Ainda, as plantas de milho possuem desenvolvimento acentuado em um curto espaço de tempo, necessitam de maiores teores de fósforo disponíveis do que as culturas perenes (BASTOS et al. 2010).

Outro fator a ser considerado, é que a disponibilidade de fósforo em alguns solos pode ser baixa. Os ânions fosfatos livres na solução do solo são rapidamente fixados por meio de interações com outros íons como cálcio, alumínio e ferro (TIMOFEEVA et al. 2022, LI et al. 2023). Em condições de pH mais alto pode ocorrer a formação de precipitados de fosfato de cálcio, enquanto que em óxidos e hidróxidos de Fe e Al ocorre a adsorção do nutriente através de complexação por ligações covalentes com troca de ligantes, muitos fortes, sendo favorecida por pH baixo (PENN & CAMBERATO 2019). Estima-se que apenas 5–25% do fosfato nos fertilizantes químicos são absorvidos pelas plantas (LI et al. 2023).

Estas interações são especialmente significativas em solos mais intemperizados, como ocorre no Brasil. Devido a afinidade que o nutriente apresenta pelos minerais encontrados nessas condições, as ligações são difíceis de serem desfeitas, tornando um possível residual da adubação pouco disponível para cultivos subsequentes (MENEZES-BLACKBURN et al. 2018, ZHU et al. 2018).

Este acúmulo de P no solo poderia ser utilizado na nutrição das plantas, em substituição à adição de fertilizantes minerais, porém o acesso das culturas a essa fonte depende de muitas variáveis (DOYDORA et al. 2020). Como alternativa para aumentar a biodisponibilidade de P às plantas e reduzir a demanda por fertilizantes solúveis, o uso da associação de microrganismos com as plantas têm se mostrado promissores, com destaque para os fungos micorrízicos, cujo efeito benéfico na absorção de fósforo é amplamente conhecido em diversas culturas, e para as bactérias solubilizadoras de fosfato.

Muitas espécies vegetais formam simbiose com fungos micorrízicos arbusculares presentes na sua rizosfera, e o milho é considerado altamente dependente dessa associação simbiótica em condições de baixo suprimento de fósforo (SALGADO et al. 2017). Em estudo analisando a eficiência das micorrizas arbusculares na cultura do milho, os autores verificaram um aumento da absorção de P e do rendimento de grãos nas plantas que receberam a inoculação em relação às que não possuíam inoculação (STOFFEL et al. 2020). Além disso, os tratamentos inoculados apresentaram maior rendimento econômico do que aqueles adubados e não inoculados, mesmo recebendo apenas metade da dose recomendada de P, indicando melhor aproveitamento do nutriente presente no solo.

Além da inoculação com fungos micorrízicos, o uso de bactérias solubilizadoras de fosfato também se mostram promissoras para a diminuição da adubação solúvel (OWEN et al. 2015). Estes organismos são capazes de atuar diretamente na solubilização do P e/ou na liberação de fosfatos solúveis através de sua ação quelante (PAIVA et al. 2020). Dentro da diversa gama de microrganismos solubilizadores de P, se destacam as bactérias do gênero *Bacillus*, como a *B. megaterium*, isolada da rizosfera de milho, que tem a capacidade de produzir fosfatase e solubilizar fosfatos de cálcio e de rocha, e a *B. subtilis*, que é endofítica, gera alta produção de ácido glucônico e enzima fitase, além de solubilizar fosfato de cálcio e ferro (PAIVA et al. 2020). O emprego destas bactérias proporcionou um ganho médio de 8,9% na produtividade, e aumento de 19% na exportação de P (PAIVA et al. 2020).

Além das aplicações isoladas, os consórcios entre microrganismos têm ganhado destaque, buscando características complementares entre os organismos, que se relacionem de forma sinérgica. Esta combinação pode ser feita entre cepas de um mesmo grupo, ou entre grupos diferentes, como fungos e bactérias (CARNEIRO et al. 2023). Porém, é importante avaliar a compatibilidade dos organismos para

evitar que ocorra um efeito antagônico que resulte em prejuízos para o desenvolvimento vegetal.

Embora existam diversos estudos avaliando a inoculação de microrganismos solubilizadores de fosfato em culturas anuais, poucos são os que verificam a interação entre esses e os fungos micorrízicos, em especial na região do extremo sul catarinense. Desta maneira, o objetivo deste trabalho foi avaliar o uso das bactérias solubilizadoras de fosfato *Bacillus megaterium* e *Bacillus subtilis* e do fungo micorrízico *Rhizophagus intraradices*, bem como a interação entre eles, na possibilidade de redução da adubação fosfatada na cultura do milho.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no Instituto Federal Catarinense – Campus Santa Rosa do Sul. O clima da região, segundo Köppen, é do tipo Cfa, com temperatura média de 19,5 °C e chuvas bem distribuídas, com precipitação anual média de 1789 mm. Os dados diários de precipitação e temperatura durante o período de condução do experimento são apresentados na Figura 1. O solo na área experimental foi classificado como GLEISSOLO MELÂNICO (SANTOS et al. 2018), cujos atributos químicos e teor de argila são apresentados na tabela 1.

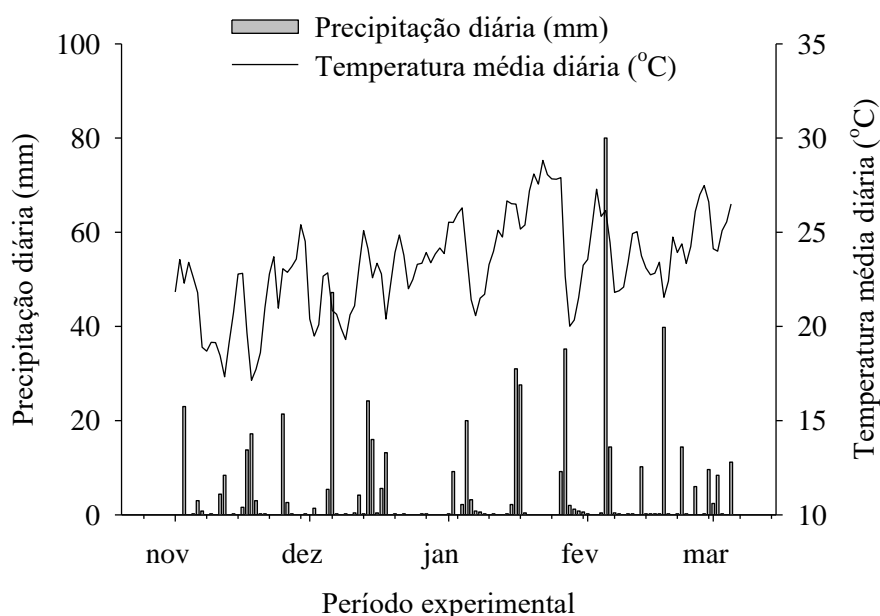


Figura 1. Valores diários de precipitação e temperatura média registrados durante a condução do experimento. Dados obtidos na estação experimental de Araranguá – SC no período de 01/11/2021 a 05/03/2022. Fonte: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária de Santa Catarina (EPAGRI).

Figure 1. Precipitation daily values and mean temperature recorded during the experiment conduction. Data obtained at Araranguá-SC experimental station in the period of 11/01/2021 to 3/05/2022. Source: Brazilian Agricultural Research Corporation of Santa Catarina (EPAGRI).

Tabela 1. Análise química e porcentagem de argila na camada de 0-0,20 m do solo na área experimental.

Table 1. Chemical analysis and percentage of soil clay in the 0-0.20 m layer in the experimental area.

| Argila (%) | pH SMP | pH H ₂ O | MO* (%) | P (mg dm ⁻³) | K | Al | Ca (cmolc dm ⁻³) | Mg | CTC | V | m (%) |
|------------|--------|---------------------|---------|--------------------------|----|-----|------------------------------|-----|-----|------|-------|
| 20 | 6,5 | 5,3 | 2,1 | 108,5 | 79 | 0,1 | 3,6 | 1,8 | 8,1 | 68,5 | 2,1 |

*SMP= índice SMP; MO = matéria orgânica; P= fósforo extraído por solução de Mehlich-1; K= potássio trocável; Al = alumínio trocável; Ca = cálcio trocável; Mg = magnésio trocável; CTC= capacidade de troca de cátions; V= saturação de bases; m = saturação por alumínio.

O delineamento experimental foi em blocos casualizados com quatro repetições, em esquema fatorial 4x3, sendo o fator A composto pelo uso de inoculantes, e o fator B por doses de adubação fosfatada. Os tratamentos que compõem o fator A consistiram em: inoculação com o solubilizador de fosfato BiomaPhos®, composto pelas bactérias *Bacillus megaterium* (cepas BRM 119) e *Bacillus subtilis* (cepas Rev. Ciênc. Agrovet., Lages, SC, Brasil (ISSN 2238-1171)

BRM 2084), na dose de 100 ml ha⁻¹; inoculação com o fungo micorrízico *Rhizophagus intraradices*, na dose de 120 g ha⁻¹ com concentração de 20.800 propágulos por grama; coinoculação com BiomaPhos® e fungo micorrízico; e ausência de inoculação. Ambos os inoculantes foram aplicados via tratamento de sementes no momento da semeadura conforme recomendações técnicas dos fabricantes. Já para o fator B, foram adotados os valores de 100, 75 e 50% da dose de P recomendada conforme a interpretação da análise de solo, seguindo o Manual de Adubação e Calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (CQFS 2016), correspondendo a 74, 55 e 37 kg ha⁻¹ de P₂O₅, aplicados na forma de superfosfato triplo, totalizando 180,135 e 90 kg ha⁻¹ de fertilizante, respectivamente.

A semeadura do milho ocorreu em outubro de 2021 em sistema de plantio direto sob palhada de aveia branca (*Avena sativa*), sendo utilizada a cultivar Feroz da Syngenta, um híbrido simples de ciclo precoce, com tecnologia de resistência a lagartas e ao glifosato. O espaçamento utilizado foi de 0,5 m entrelinhas, visando alcançar uma população final de 60.000 plantas ha⁻¹. Cada parcela foi composta por seis linhas de semeadura, com uma área útil de 10 m².

A adubação nitrogenada e potássica foi realizada conforme a interpretação da análise de solo (Tabela 1), seguindo o Manual de Adubação e Calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (CQFS 2016), para uma expectativa de rendimento de 10 toneladas. Foram aplicados 168 kg ha⁻¹ de N na forma de ureia, sendo 40 kg ha⁻¹ na semeadura e o restante em cobertura, dividido entre os estádios fenológicos V4 e V6. Foram também aplicados 154 kg ha⁻¹ de K₂O na forma de cloreto de potássio, sendo 62 kg ha⁻¹ na semeadura e o restante em cobertura juntamente com a adubação nitrogenada.

As variáveis analisadas foram: altura de plantas, teor de clorofila foliar, área foliar, número médio de grãos por espiga, peso médio de mil grãos e produtividade. A altura de plantas foi determinada no estágio fenológico R1, com base na escala fenológica proposta por RITCHIE et al. (1993), com auxílio de uma fita métrica, medindo da base do colmo até a última folha totalmente expandida. Nesse mesmo estágio foi avaliado o teor de clorofila foliar, utilizando o clorofilômetro portátil de contato ClorofiLOG modelo CFL1030, na folha-índice localizada no mesmo nó do colmo onde está inserida a espiga principal da planta. A área foliar foi obtida a partir da medição de todas as folhas com mais de 50% de área verde, de quatro plantas por parcela, e calculada pela expressão (SANGOI et al. 2007):

$$AF = C \times L \times 0,75 \quad (1)$$

Em que: AF é a área foliar total (cm²), C é o comprimento da folha (cm) e L é a largura da folha (cm).

A colheita foi realizada em março de 2022, de forma manual nas quatro linhas centrais de cada parcela, descartando as três plantas de cada extremidade da linha que serviram como bordadura, quando os grãos atingiram aproximadamente 22% de umidade. Após a colheita, as espigas foram submetidas à debulha manual. A determinação do número médio de grãos por espiga foi realizada através da contagem manual dos grãos. O peso de mil grãos foi determinado por meio da contagem e pesagem dos grãos amostrados em cada parcela, em balança analítica de precisão. A estimativa da produtividade se deu através do peso de mil grãos, sendo posteriormente convertido para kg ha⁻¹, expresso na unidade padrão de 130 g kg⁻¹.

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância a 5% de probabilidade. Quando constatada diferença significativa entre os tratamentos, foi realizada a comparação de médias pelo teste de Tukey (p ≤ 0,05).

Após análise estatística, realizou-se de forma descritiva o custo operacional total (COT) com base na planilha de custos de produção para milho com utilização de alta tecnologia desenvolvida pelo Centro de Socioeconomia e Planejamento Agrícola da Epagri - (EPAGRI/CEPA 2022), que considera as despesas com insumos, os serviços com operações, e os custos totais de produção. Os valores em reais foram convertidos para dólares americanos, utilizando-se o valor em reais do dólar médio de R\$5,05. Este valor se refere ao valor médio do dólar da primeira quinzena de março de 2022.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os tratamentos não diferiram estatisticamente e não houve interação entre os fatores quanto à altura de plantas (Tabela 2).

Os valores obtidos estão de acordo com o relatado para a cultivar (ARAÚJO et al. 2016), mostrando que não houve prejuízos ao crescimento das plantas em nenhum dos tratamentos. Este resultado pode estar relacionado ao alto teor inicial de P encontrado no solo da área experimental (Tabela 1), que foi

suficiente para este atributo.

O nutriente P participa de diversos processos celulares, como a manutenção de membranas, síntese de biomoléculas e formação de componentes energéticos, como ATP, que vai ser usada como a principal fonte de energia para os diversos processos metabólicos da planta, como fotossíntese e divisão celular. Assim, em casos de deficiência de P, as plantas apresentam menor crescimento, em função da diminuição da fotossíntese ou de maior investimento energético (MALHOTRA et al. 2018). Este efeito é demonstrado nos resultados encontrados por PATIL et al. (2012), onde plantas que receberam maiores doses do nutriente conseguiam expressar um maior porte em relação às demais, em condições de baixa disponibilidade inicial.

Tabela 2. Altura de plantas nos tratamentos com inoculações de diferentes microrganismos solubilizadores de fosfato combinado com diferentes porcentagens da dose recomendada de fósforo (P).

Table 2. Height of plants in treatments with inoculations of different phosphate-solubilizing microorganisms combined with different percentages of the recommended dose of phosphorus (P).

| | 100% da dose de P | 75% da dose de P | 50% da dose de P |
|-------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | | m | |
| Sem inoculante | 2,36 ^{ns} | 2,39 ^{ns} | 2,37 ^{ns} |
| Micorrizas | 2,39 | 2,39 | 2,36 |
| BiomaPhos® | 2,39 | 2,41 | 2,43 |
| Micorrizas + BiomaPhos® | 2,37 | 2,42 | 2,44 |
| CV (%) | | 2,26 | |

^{ns} Diferenças não significativas pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

Analisando os dados relativos ao teor de clorofila foliar (Tabela 3) observa-se efeito significativo apenas no tratamento que recebeu 75% da dose recomendada de P e sem inoculação, que foi inferior aos tratamentos de mesma dose com inoculação e também ao tratamento sem inoculante com 100% da dose de P.

Tabela 3. Teor de clorofila foliar nos tratamentos com inoculações de diferentes microrganismos solubilizadores de fosfato combinado com diferentes porcentagens da dose recomendada de fósforo (P).

Table 3. Leaf chlorophyll content in treatments with inoculations of different phosphate-solubilizing microorganisms combined with different percentages of the recommended dose of phosphorus (P).

| | 100% da dose de P | 75% da dose de P | 50% da dose de P |
|------------------------|-----------------------|------------------|------------------|
| Sem inoculante | 64,42 Aa ¹ | 58,15 Bb | 61,97 Aab |
| Micorrizas | 64,52 Aa | 62,25 ABa | 66,07 Aa |
| BiomaPhos® | 65,85 Aa | 64,22 Aa | 66,35 Aa |
| Micorrizas+ BiomaPhos® | 67,07 Aa | 66,75 ABa | 66,37 Aa |
| CV(%) | | 5,51 | |

¹Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, maiúscula na coluna e minúscula na linha, pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

Embora existam relações entre o teor de P na planta e a atividade da clorofila, relacionados ao processo fotossintético, a variação nos teores de clorofila está mais relacionada com a disponibilidade de N (PAVLOVIĆ et al. 2014, FRYDENVANG et al. 2015).

Em relação à área foliar (Tabela 4), quando metade da dose recomendada de P foi aplicada, o tratamento sem inoculação foi inferior àqueles com inoculação, sendo ainda inferior ao tratamento não inoculado e com 100% da dose.

O fornecimento inadequado de fósforo diminui a divisão celular, reduzindo o aparecimento, a expansão e a longevidade das folhas, bem como o índice da área foliar e a interceptação da radiação solar (SICHOCKI et al. 2014, MALHOTRA et al. 2018). Assim, observa-se que os microrganismos foram eficientes em garantir uma maior disponibilidade de P para as plantas em condições de menor fornecimento.

Foram observadas algumas diferenças significativas nos componentes de rendimento e, conseqüentemente, na produtividade final da área. Com relação ao número médio de grãos por espiga (Tabela 5) o tratamento com a inoculação de micorrizas + BiomaPhos® foi inferior ao com somente

BiomaPhos® quando combinado com 100% da dose recomendada de P, entretanto foi superior aos demais quando a dose foi reduzida para 75%, e superior à testemunha sem inoculação com aplicação de 50% da dose de P. Quando comparados os resultados entre doses, o tratamento com a inoculação de micorrizas + BiomaPhos® com 100% da dose resultou em menores valores em comparação com o mesmo tratamento nas menores doses. Ainda, a inoculação apenas com micorriza resultou em valores superiores na dose de 50% em relação a 75% da dose recomendada de P.

Tabela 4. Área foliar de plantas nos tratamentos com inoculações de diferentes microrganismos solubilizadores de fosfato combinado com diferentes porcentagens da dose recomendada de fósforo (P).

Table 4. Leaf area of plants in treatments with inoculations of different phosphate solubilizing microorganisms combined with different percentages of the recommended dose of phosphorus (P).

| | 100% da dose de P | 75% da dose de P | 50% da dose de P |
|-------------------------|------------------------|------------------|------------------|
| | cm ² | | |
| Sem inoculante | 586,25 Aa ¹ | 548,25 Aab | 509,86 Bb |
| Micorrizas | 562,41 Aa | 563,01 Aa | 579,97 Aa |
| BiomaPhos® | 539,02 Aa | 572,70 Aa | 568,74 ABa |
| Micorrizas + BiomaPhos® | 568,24 Aa | 572,61 Aa | 568,74 ABa |
| CV(%) | 5,77 | | |

¹ Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, maiúscula na coluna e minúscula na linha, pelo teste Tukey (p<0,05).

Tabela 5. Número médio de grãos por espiga nos tratamentos com inoculações de diferentes microrganismos solubilizadores de fosfato combinado com diferentes porcentagens da dose recomendada de fósforo (P).

Table 5. Average number of grains per cob in treatments with inoculations of different phosphate solubilizing microorganisms combined with different percentages of the recommended dose of phosphorus (P).

| | 100% da dose de P | 75% da dose de P | 50% da dose de P |
|-------------------------|-------------------------|------------------|------------------|
| Sem inoculante | 490,73 ABa ¹ | 473,14 Ba | 483,95 Ba |
| Micorrizas | 497,01 ABab | 473,12 Bb | 503,23 ABa |
| BiomaPhos® | 518,29 Aa | 487,77 Ba | 494,57 ABa |
| Micorrizas + BiomaPhos® | 476,99 Bb | 531,84 Aa | 527,68 Aa |
| CV(%) | 4,10 | | |

¹ Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, maiúscula na coluna e minúscula na linha, pelo teste Tukey (p<0,05).

O peso médio de mil grãos foi inferior no tratamento com a inoculação de micorrizas + BiomaPhos® em relação ao com somente BiomaPhos® quando combinado com 50% da dose recomendada de P (Tabela 6). Comparando as doses, apenas no tratamento com inoculação do BiomaPhos® foram observadas diferenças, sendo os maiores valores obtidos com a aplicação de 50% da dose em relação às demais.

Tabela 6. Peso médio de mil grãos nos tratamentos com inoculações de diferentes microrganismos solubilizadores de fosfato combinado com diferentes porcentagens da dose recomendada de fósforo (P).

Table 6. Average weight of thousand grains in treatments with inoculations of different phosphate solubilizing microorganisms combined with different percentages of the recommended dose of phosphorus (P).

| | 100% da dose de P | 75% da dose de P | 50% da dose de P |
|-------------------------|------------------------|------------------|------------------|
| | g | | |
| Sem inoculante | 202,65 Aa ¹ | 200,82Aa | 197,72 ABa |
| Micorrizas | 194,53 Aa | 195,95Aa | 201,89 ABa |
| BiomaPhos® | 196,64 Ab | 196,16Ab | 208,52 Aa |
| Micorrizas + BiomaPhos® | 198,64 Aa | 201,15Aa | 194,07 Ba |
| CV(%) | 3,05 | | |

¹ Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, maiúscula na coluna e minúscula na linha, pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

Analisando a produtividade, observa-se diversos resultados significativos, tanto nos tratamentos em cada dose quanto entre doses (Tabela 7). Quando aplicado 100% da dose recomendada de P, o tratamento com inoculação de micorrizas foi inferior aos demais, e o tratamento sem inoculação resultou em maior rendimento do que o tratamento com a inoculação de micorrizas + BiomaPhos®.

O tratamento com micorrizas também foi inferior quando combinado com 75% da dose de P, condição onde o tratamento sem inoculação foi superior ao com BiomaPhos®. Já quando aplicada metade da dose recomendada, o tratamento com BiomaPhos® foi superior aos demais, e a inoculação com micorrizas resultou em maior produtividade do que o sem inoculação e o coinoculado. Comparando os resultados entre doses, observa-se que a inoculação com micorrizas e com BiomaPhos® separadamente, foram superiores quando combinadas com a dose de 50% em relação às demais. Em contrapartida, os tratamentos sem inoculação e com a inoculação dos microrganismos resultaram em menor produtividade com 50% da dose aplicada em relação às demais.

Tabela 7. Produtividade de grãos nos tratamentos com inoculações de diferentes microrganismos solubilizadores de fosfato combinado com diferentes porcentagens da dose recomendada de fósforo (P).

Table 7. Grain productivity in treatments with inoculations of different phosphate-solubilizing microorganisms combined with different percentages of the recommended dose of phosphorus (P).

| | 100% da dose de P | 75% da dose de P | 50% da dose de P |
|-------------------------|--------------------------|------------------|------------------|
| | (kg ha ⁻¹) | | |
| Sem inoculante | 12273,11 Aa ¹ | 12258,38 Aa | 11242,06 Cb |
| Micorrizas | 11503,45 Cb | 11439,14 Cb | 11920,11 Ba |
| BiomaPhos® | 11918,22 ABb | 11878,13 Bb | 12726,89 Aa |
| Micorrizas + BiomaPhos® | 11918,50 Ba | 11971,39 ABa | 11242,06 Cb |
| CV(%) | 1,42 | | |

¹ Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, maiúscula na coluna e minúscula na linha, pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

Embora os resultados relacionados aos componentes de rendimento tenham sido bastante variados, observa-se uma tendência de superioridade dos tratamentos inoculados com BiomaPhos®, e aumento do efeito benéfico da inoculação com a diminuição da dose de P aplicada. Os resultados estão de acordo com o relatado na literatura, onde diversos estudos demonstram efeitos positivos das bactérias promotoras do crescimento vegetal e solubilizadoras de fosfato no desenvolvimento vegetal (HUSSAIN et al. 2013, BAIG et al. 2014, LI et al. 2017).

As bactérias do gênero *Bacillus*, que compõem o BiomaPhos®, são conhecidas por apresentarem múltiplas características benéficas, que auxiliam as plantas direta ou indiretamente, através da aquisição de nutrientes, produção de fitohormônios, proteção contra patógenos e outros estressores abióticos. Através da produção de ácidos orgânicos, estas bactérias são capazes de solubilizar o P retido, ou ainda mineralizar o P orgânico, tornando assimiláveis para as plantas formas anteriormente indisponíveis (SAXENA et al. 2019). Dessa forma, a atividade da bactéria consegue compensar a redução da adubação fornecida, garantindo um bom aporte de nutriente para as plantas e influenciando na produtividade final da cultura, conforme observado no presente estudo.

Avaliando a influência das bactérias solubilizadoras de fosfato na cultura do milho, AMANULLAH & KHAN (2015) constataram que, quando feito o uso dessas bactérias, houve um incremento no número de grãos por espiga, peso de mil grãos e na produtividade, além de possibilitar a redução da dose de fósforo em 25%, sem comprometer a produtividade.

Nos experimentos conduzidos por GUIMARÃES et al. (2021), foram evidenciados os efeitos benéficos da inoculação com *B. subtilis* e *B. megaterium* na cultura do milho, tanto para variáveis morfológicas, quando nutricionais e de produção, concluindo que a inoculação associada à metade da dose recomendada resultou em produção semelhante à obtida com 100% da dose.

Com relação à maior eficiência da inoculação nas menores doses de P, este efeito também é relatado na literatura. A simbiose através da inoculação micorrízica pode promover incrementos no desenvolvimento

da planta mesmo quando associada às maiores doses de adubação, mas esses incrementos são menores (ORTAS 2012). Porém, em condições onde há baixa disponibilidade inicial de P, a inoculação com as micorrizas aumenta a absorção de nutrientes nas plantas (BOWLES et al. 2016), e quando associada à aplicação de doses intermediárias de fósforo, os rendimentos obtidos se igualam àqueles das maiores doses (CABRALES et al. 2016).

Em experimento visando avaliar a utilização de fungos micorrízicos arbusculares na cultura do milho, com diferentes doses de fósforo, KAZADI et al. (2022) constataram que a utilização destes microrganismos promoveu maior desenvolvimento das plantas e possibilitou redução de 50% da dose do fertilizante mineral fosfatado.

No estudo de STOFFEL et al. (2020), o efeito do teor inicial de P no solo ficou evidenciado, sendo maiores quanto menores os teores de P. Em solo com teor considerado alto, a inoculação sem adubação fosfatada não promoveu incrementos estatisticamente significativos, porém suficientes para igualar a produtividade obtida com 100% da dose de P e sem inoculação. Este resultado indica que seria possível suprimir a adubação sem prejuízos para a produção.

Considerando o teor inicial de P no presente estudo, é possível conjecturar que a supressão da adubação também resultaria em maiores efeitos da inoculação e produtividades equivalentes. Esta suposição é especialmente válida para a inoculação BiomaPhos®, que já apresentou maior produtividade com a diminuição da adubação fosfatada do que nas maiores doses.

A presença de adubação fosfatada solúvel também diminui a eficiência da bioinoculação com bactérias (VIRUEL et al. 2014, ADNAN et al. 2020). Porém, quando combinada com fontes alternativas de adubação fosfatada, ou com redução de doses de adubos solúveis, proporciona o aumento da eficiência para essas fontes (HUSSAIN et al. 2013, BAIG et al. 2014, ADNAN et al. 2020), indicando que esta combinação poderia substituir adequadamente a adubação fosfatada solúvel.

O sucesso da inoculação com microrganismos depende de diversos fatores relacionados ao ambiente, como pH do solo, umidade, temperatura e sanidade da planta, bem como das características dos microrganismos. Valores mais altos de pH no solo favorecem o desenvolvimento de bactérias, enquanto que fungos se adaptam melhor a ambientes mais ácidos (LOPES et al. 2021). Assim, as condições de solo do presente estudo (Tabela 1) se mostram mais favoráveis às bactérias, o que corrobora com a tendência de superioridade nos tratamentos com *Bacillus* em relação às micorrizas.

A coinoculação de micorrizas e bactérias não se mostrou promissora de acordo com os resultados obtidos, apresentando eficiência inferior à inoculação isolada, especialmente em relação à produtividade quando a dose de P foi reduzida à metade. Os resultados diferem do obtido por SURI et al. (2011), onde a inoculação com micorrizas isoladas ou em conjunto com bactérias solubilizadoras de P, com ou sem adubação adicional, aumentou a produtividade de milho. Entretanto, é importante ressaltar que o solo apresentava deficiência do nutriente, diferente do presente estudo onde os teores iniciais eram muito altos (Tabela 1).

No estudo realizado por ROMERO-MUNAR et al. (2023) a coinoculação de *Rhizophagus irregularis* e *Bacillus megaterium* resultou em um aumento da tolerância de plantas de milho ao estresse hídrico e de altas temperaturas, através de alterações fisiológicas, indicando que o efeito pode ser benéfico para o desenvolvimento das plantas em condições adversas. Como no presente estudo a disponibilidade de água e temperatura não se mostraram limitantes (Figura 1), este efeito não foi observado.

O custo operacional total foi obtido através da avaliação econômica dos insumos utilizados e dos custos variáveis, e a síntese dos resultados está apresentada na Tabela 8.

Considerando que as etapas de produção foram iguais em toda a área experimental, a diferença nos custos está relacionada com os produtos aplicados, sendo o menor custo obtido no tratamento sem inoculação e com 50% da dose de P, e o maior no tratamento com 100% da adubação fosfatada e com coinoculação, sendo que os custos aumentam conforme a quantidade utilizada de fertilizante fosfatado é maior.

As receitas estão relacionadas à produtividade média obtida nos tratamentos, dessa forma sendo maior no tratamento com 50% da adubação fosfatada e inoculação com BiomaPhos®, que apresentou a maior produtividade, em valores absolutos, e menor no tratamento com 100% da adubação e com coinoculação, na margem de lucro bruta, obtida pela diferença entre custos e receitas, observa-se o mesmo resultado das receitas.

O tratamento sem inoculante com 100% da dose recomendada de P, que seria o padrão, tem um

custo operacional de \$106,93 acima do obtido no tratamento com 50% da dose + BiomaPhos®, devido ao alto custo do fertilizante, e quando comparada a margem de lucro, esse valor ultrapassa os \$237,62.

O resultado está de acordo com o obtido por KAUR & REDDY (2015), onde também foi observada maior viabilidade econômica na produção de milho utilizando bactérias solubilizadoras de fosfato, porém combinadas com a aplicação de rocha fosfática, devido à diminuição dos custos e aumento das receitas, uma vez que o tratamento promoveu maior desenvolvimento e produtividade em comparação com outros tratamentos, incluindo adubação química fosfatada.

Tabela 8. Avaliação econômica dos tratamentos com inoculações de diferentes microrganismos solubilizadores de fosfato combinado com diferentes porcentagens da dose recomendada de fósforo (P) na cultura do milho na safra 2021/2022.

Table 8. Economic evaluation of treatments with inoculations of different phosphate-solubilizing microorganisms combined with different percentages of the recommended dose of phosphorus (P) in corn in the 2021/2022 harvest.

| Tratamentos | Custos Totais ¹ | Receita Bruta ² | Margem Bruta ³ |
|---------------------------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|
| | | Dólares por hectare | |
| Sem Inoculante + 100% da dose de P | 2148,46 | 3787,21 | 1638,76 |
| Sem Inoculante + 75% da dose de P | 2084,86 | 3782,58 | 1697,73 |
| Sem Inoculante + 50% da dose de P | 2018,48 | 3564,11 | 1545,63 |
| Micorrizas + 100% da dose de P | 2202,83 | 3628,17 | 1425,34 |
| Micorrizas + 75% da dose de P | 2138,01 | 3529,86 | 1391,85 |
| Micorrizas + 50% da dose de P | 2076,40 | 3678,16 | 1601,76 |
| BiomaPhos® + 100% da dose de P | 2167,40 | 3697,79 | 1530,39 |
| BiomaPhos® + 75% da dose de P | 2103,44 | 3665,39 | 1561,95 |
| BiomaPhos® + 50% da dose de P | 2043,31 | 3927,37 | 1884,06 |
| Micorrizas + BiomaPhos® + 100% da dose de P | 2223,58 | 3677,79 | 1454,21 |
| Micorrizas + BiomaPhos® + 75% da dose de P | 2160,25 | 3694,08 | 1533,83 |
| Micorrizas + BiomaPhos® + 50% da dose de P | 2093,79 | 3469,13 | 1375,34 |

¹Somatório dos custos com insumos e serviços na produção. ² Valor obtido com a produção, considerando o preço de \$18,51 por saca de 60 kg. ³ Diferença entre os custos totais e a receita bruta.

Desta maneira, a redução da dose de adubação juntamente com a bioinoculação se mostra como uma alternativa viável, pois torna a produção mais econômica e também mais sustentável do ponto de vista ambiental, uma vez que diminui o uso do fertilizante mineral, cujo uso excessivo aumenta o risco de eutrofização e leva ao esgotamento das fontes naturais de rochas fosfáticas, resultando ainda em impacto econômico com o aumento do preço dos fertilizantes (ZHU et al. 2018).

CONCLUSÃO

A aplicação de inoculante a base de *Bacillus megaterium* e *Bacillus subtilis* permitiu a redução da dose de fertilizante fosfatado mineral pela metade, mantendo os níveis de produtividade com menor custo e maior margem de lucro, sendo uma alternativa viável para a cultura do milho na área de estudo.

A coinoculação entre micorrizas e bactérias solubilizadoras de fosfato foi menos eficiente que a inoculação individual, resultando em menor produtividade e margem de lucro.

REFERÊNCIAS

- ADNAN M et al. 2020 Coupling Phosphate-Solubilizing Bacteria with Phosphorus Supplements Improve Maize Phosphorus Acquisition and Growth under Lime Induced Salinity Stress. *Plants* 9: 900.
- AMANULLAH B & KHAN A. 2015. Phosphorus and Compost Management Influence Maize (*Zea mays*) Productivity Under Semiarid Condition with and without Phosphate Solubilizing Bacteria. *Frontiers in Plant Science* 6: 1083.
- ARAÚJO LS et al. 2016. Desempenho agrônomo de híbridos de milho na região sudeste de Goiás. *Revista Agro@mbiente On-line* 10: 334-341.
- BAIG KS et al. 2014. Improving growth and yield of maize through bioinoculants carrying auxin production and phosphate solubilizing activity. *Soil and Environment* 33: 159-168.
- BASTOS AL et al. 2010 Response of corn to doses of phosphorus. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental* 14: 485-491.
- BOWLES TM et al. 2016. Effects of arbuscular mycorrhizae on tomato yield, nutrient uptake, water relations, and soil carbon dynamics under deficit irrigation in field conditions. *Science of the Total Environment* 566-567: 1223-1234

- CABRALES EM et al. 2016. Efecto de micorrizas nativas y fósforo en los rendimientos del maíz en Guárico, Venezuela. *Revista Temas Agrários* 21: 21-31.
- CARNEIRO B et al. 2023. Forward-looking on new microbial consortia: Combination of rot fungi and rhizobacteria on plant growth-promoting abilities. *Applied Soil Ecology* 182: 104689
- COELHO AM. 2006. Nutrição e Adubação do Milho. Sete Lagoas: EMBRAPA. 10p. (Circular Técnica 78).
- CONAB. 2022. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira de grãos: Safra 2021/2022. Brasília: CONAB. 117p. (Boletim Técnico 9).
- CQFS. 2016. 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. SBSCS. 376 p. (Manual).
- DOYDORA S et al. 2020. Accessing Legacy Phosphorus In Soils. *Soil System* 4: 74.
- EPAGRI. 2022. Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina / Centro de Socioeconomia e Planejamento Agrícola. Custo de Produção 2022 para milho com alta tecnologia. Disponível em: <https://cepa.epagri.sc.gov.br/index.php/produtos/custos-de-producao/>. Acesso em: 10 set 2022.
- EPAGRI. 2020. Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina. Síntese Anual da Agricultura de Santa Catarina. Florianópolis: EPAGRI. 195p. (Boletim Técnico).
- FRYDENVANG J et al. 2015. Sensitive Detection of Phosphorus Deficiency in Plants Using Chlorophyll a Fluorescence. *Plant Physiology* 169: 353–361.
- GUIMARÃES VF et al. 2021. Inoculant efficiency containing *Bacillus megaterium* (B119) and *Bacillus subtilis* (B2084) for maize culture, associated with phosphate fertilization. *Research, Society and Development* 10: 1-28.
- HUSSAIN MI et al. 2013. Impact of phosphate solubilizing bacteria on growth and yield of maize. *Plant Soil and Environment* 32: 71-78.
- KAUR G & REDDY MS. 2015. Effects of Phosphate-Solubilizing Bacteria, Rock Phosphate and Chemical Fertilizers on Maize-Wheat Cropping Cycle and Economics. *Pedosphere* 25: 428-437.
- KAZADI AT et al. 2022. Effect of phosphorus and arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) inoculation on growth and productivity of maize (*Zea mays* L.) in a Tropical Ferralsol. *Gesunde Pflanzen* 74: 159-165.
- LI H et al. 2023. Roles of phosphate-solubilizing bacteria in mediating soil legacy phosphorus availability. *Microbiological Research* 18: 1-11.
- LI Y et al. 2017. Colonization and Maize Growth Promotion Induced by Phosphate Solubilizing Bacterial Isolates. *International Journal of Molecular Sciences* 18: 1-16.
- LOPES MGS et al. 2021. Successful Plant Growth-Promoting Microbes: Inoculation Methods and Abiotic Factors. *Frontiers in Sustainable Food Systems* 5: 1-13.
- MALHOTRA H et al. 2018. Phosphorus Nutrition: Plant Growth in Response to Deficiency and Excess. In: HASANUZZAMAN M et al. (eds). *Plant Nutrients and Abiotic Stress Tolerance* 171-190.
- MENEZES-BLACKBURN D et al. 2018. Opportunities for mobilizing recalcitrant phosphorus from agricultural soils: a review. *Plant Soil* 427: 5-16.
- ORTAS I. 2012. Do maize and pepper plants depend on mycorrhizae in terms of phosphorus and zinc uptake? *Journal of Plant Nutrition* 35: 1639-1656.
- OWEN D et al. 2015. Use of commercial bioinoculants to increase agricultural production through improved phosphorus acquisition. *Applied Soil Ecology* 86: 41-54.
- PAIVA CAO et al. 2020. Recomendação agrônômica de cepas de *Bacillus subtilis* (CNPMS B2084) e *Bacillus megaterium* (CNPMS B119) na cultura do milho. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo. 18 p. (Circular Técnica 260).
- PATIL PM et al. 2012. Effect of phosphate solubilizing fungi and phosphorus levels on growth, yield and nutrient content in maize (*Zea mays*). *Karnataka Journal of Agriculture Science* 25: 58-62.
- PAVLOVIĆ D et al. 2014. Chlorophyll as a measure of plant health: Agroecological aspects. *Journal Pesticides and Phytomedicine* 29: 21–34.
- PENN CJ & CAMBERATO JJ. 2019. A Critical Review on Soil Chemical Processes that Control How Soil pH Affects Phosphorus Availability to Plants. *Agriculture* 9: 120
- RITCHIE SW et al. 1993. How a corn plant develops? AMES. 21 p. (Special Report 48).
- ROMERO-MUNAR A et al. 2023. Dual Inoculation with *Rhizophagus irregularis* and *Bacillus megaterium* Improves Maize Tolerance to Combined Drought and High Temperature Stress by Enhancing Root Hydraulics, Photosynthesis and Hormonal Responses. *International Journal of Molecular Sciences* 24: 5193.
- SALGADO FHM et al. 2017. Arbuscular mycorrhizal fungi and colonization stimulant in cotton and maize. *Ciência Rural* 47: 1-8.
- SANGOI L et al. 2007. Área foliar e rendimento de grãos de híbridos de milho em diferentes populações de planta. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo* 6: 263-271.
- SANTOS HG et al. 2018. Sistema brasileiro de classificação de solos. 5.ed. Brasília: Embrapa.
- SAXENA AK et al. 2019. Bacillus species in soil as a natural resource for plant health and nutrition. *Journal of Applied Microbiology* 128: 1583-1594.
- SICHOCKI D et al. 2014. Resposta do milho safrinha à doses de nitrogênio e fósforo. *Revista Brasileira Milho e Sorgo* 13: 48-58.

- STOFFEL SCG et al. 2020. Yield increase of corn inoculated with a commercial arbuscular mycorrhizal inoculant in Brazil. *Ciência Rural* 50: e20200109.
- SURI VK et al. 2011. Improving Phosphorus Use through Co-inoculation of Vesicular Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Phosphate-Solubilizing Bacteria in Maize in an Acidic Alfisol. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 42: 2265–2273.
- TIMOFEEVA A et al. 2022. Prospects for Using Phosphate-Solubilizing Microorganisms as Natural Fertilizers in Agriculture. *Plants* 11: 1-23
- VIRUEL E et al. 2014. Inoculation of maize with phosphate solubilizing bacteria: effect on plant growth and yield. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 14: 819-831.
- ZHU J et al. 2018. Phosphorus activators contribute to legacy phosphorus availability in agricultural soils: A review. *Science of the Total Environment* 612: 522-537.