

DESENVOLVIMENTO E NUTRIÇÃO INICIAL DO MILHO COM INOCULAÇÃO DO BIOMAPHOS® ASSOCIADO A FONTES FOSFATADAS

Lucas Eduardo Morais Brito¹, Augusto Leão Assis da Mata Rezende², Calebe Oliveira Crispim da Silva³, Heloísa Donizete da Silva⁴, Cayo Divino Rodrigues da Silva³, João Henrique Silva da Luz⁵

RESUMO:

Os solos brasileiros apresentam características mineralógicas que favorecem a adsorção do fósforo (P) e isto reduz a eficiência da adubação fosfatada. Uma estratégia para aumentar a acessibilidade do P residual (*legacy P*) no solo às plantas são o uso de microrganismos solubilizadores de fosfato. Aqui o objetivo foi avaliar o desenvolvimento e nutrição inicial do milho, e atributos químicos do solo após inoculação de BiomaPhos® associados a fontes fosfatadas de alta e baixa solubilidade. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, em delineamento em blocos casualizados, em esquema fatorial (2x2), com seis repetições. O primeiro fator foi fosfato natural reativo e superfosfato triplo; e o segundo fator, a inoculação ou não de BiomaPhos®. Os fertilizantes foram aplicados em vasos com capacidade de 5 dm³ de solo e os inoculantes foram aplicados nas sementes no momento da semeadura. Foram avaliados parâmetros biométricos, atributos químicos do solo e teor e acúmulo de P foliar no milho aos 45 dias após emergência (DAE). Houve interação significativa ($p \leq 0,05$) do efeito das fontes de P com inoculante para as variáveis: diâmetro do colo (DC); massa seca da raiz e da parte aérea (MSR e MSPA); relação parte aérea com a raiz (RPAR); massa seca total (MST); P foliar (Pfo); absorção de P (AP) e pH. Portanto, a associação entre os inoculantes solubilizadores de P e fertilizantes fosfatados promoveram crescimento da biomassa radicular e alteraram a disponibilidade e absorção de P durante os 45 DAE da cultura do milho. O BiomaPhos® foi mais eficiente em fonte com baixa solubilidade (FN), e seus efeitos são nulos ou negativos com fontes de P solúveis, ou seja, os microrganismos modulam o desenvolvimento do milho, o qual verificou respostas positivas do acúmulo de biomassa, teor e absorção de P do milho em estágio V6.

Palavras-chave: Inoculante, Solubilidade P, bactérias solubilizadores de P, agricultura sustentável, *Zea mays*.

DEVELOPMENT AND INITIAL NUTRITION OF CORN WITH BIOMAPHOS® INOCULANT ASSOCIATED WITH PHOSPHATE SOURCES

ABSTRACT:

Brazilian soils have mineralogical characteristics that favor the adsorption of phosphorus (P) and this reduces the efficiency of phosphate fertilization. One strategy to increase the accessibility of residual P (*legacy P*) in the soil to plants is using phosphate-solubilizing microorganisms. Here, the objective was to evaluate the initial development and nutrition of corn, and soil chemical attributes after inoculation of BiomaPhos® associated with high and low solubility phosphate sources. The experiment was carried out in a randomized block design greenhouse in a factorial scheme (2x2) with six replications. The first factor was reactive rock phosphate and triple superphosphate, and the second factor was the inoculation or not of BiomaPhos®. The fertilizers were

¹Mestrando pelo Programa de Pós-graduação em Produção Vegetal. Universidade Federal do Tocantins. Gurupi-TO. lucas_morais_@uft.edu.br; <https://orcid.org/0000-0002-1487-795X>.

²Graduando em Agronomia. Universidade de São Paulo. Piracicaba –SP. augustoleao@usp.br

³Graduando em Agronomia. Universidade Federal do Tocantins. Gurupi-TO. calebecrispim@gmail.com
cayo.silva@mail.uft.edu.br

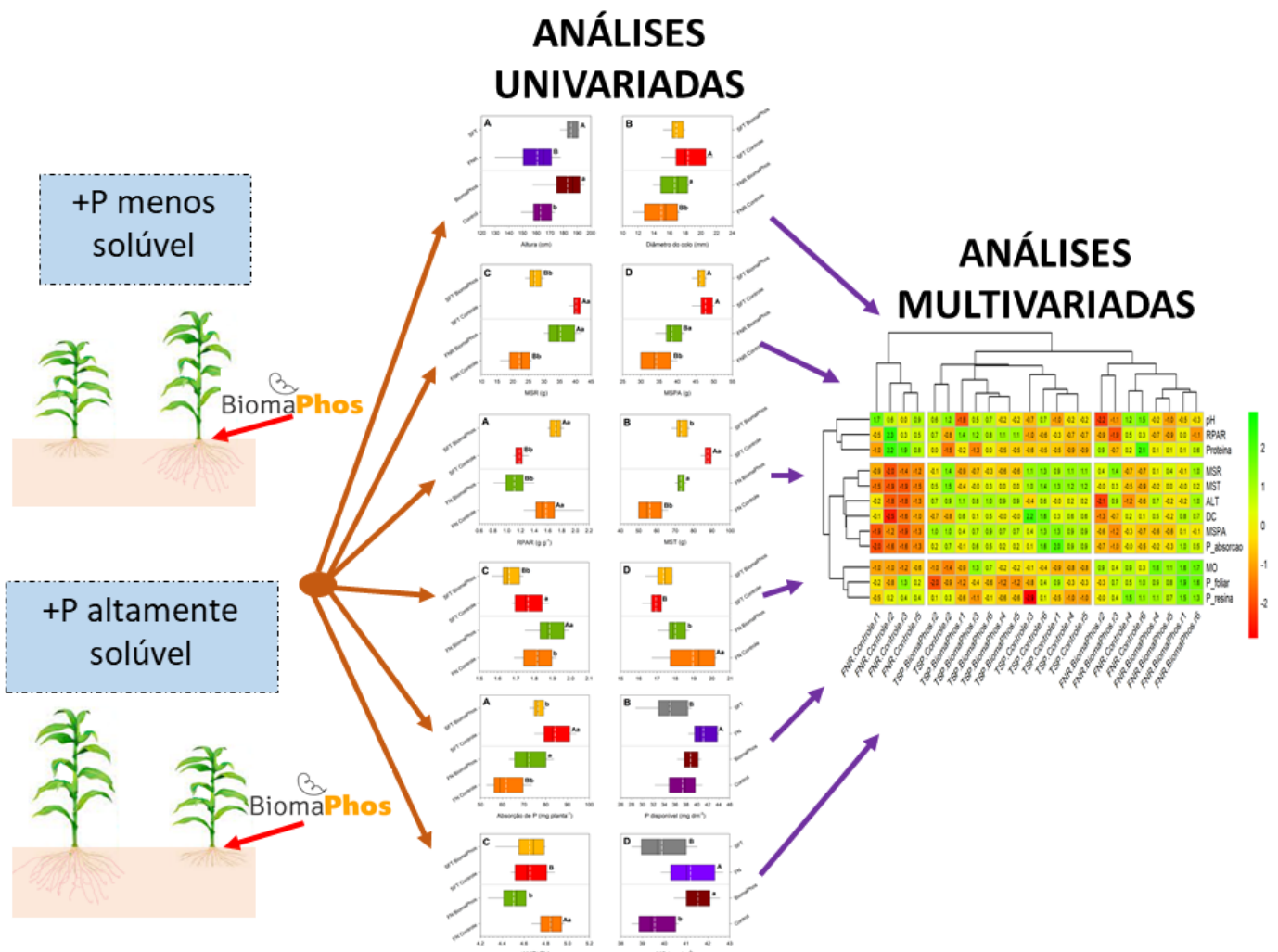
⁴Doutoranda em Produção Vegetal. Universidade Federal do Tocantins. Gurupi – TO. isadonizette@gmail.com;
<https://orcid.org/0000-0003-2509-0762>.

⁵Mestre em Solos e Nutrição de Plantas. Universidade de São Paulo. Piracicaba –SP. jhluz@usp.br; <https://orcid.org/0000-0003-4748-341X>.

applied in pots with a capacity of 5 dm³ of soil, and the inoculants were applied to the seeds at the time of sowing. Biometric parameters, soil chemical attributes, leaf P content, and accumulation in corn at 45 days after emergence (DAE) were evaluated. There was a significant interaction ($p < 0.05$) between the effect of P sources and the inoculant for the variables: collar diameter (CD); root and shoot dry mass (MSR and MSPA); shoot-to-root ratio (RPAR); total dry mass (TDM); leaf P (LP); absorption of P (PA); and pH. Therefore, the association between P-solubilizing inoculants, and phosphate fertilizers promoted root biomass growth and altered the availability and absorption of P during the 45 DAE of the corn crop. BiomaPhos[®] was more efficient in a low solubility (FN) source, and its effects are null or negative with soluble P sources. That is, the microorganisms modulate the development of corn, which verified positive responses from the accumulation of biomass, content, and P uptake from corn at stage V6.

Keywords: Inoculant, Solubility phosphate, Solubilization phosphate bacteria, sustainable agriculture, *Zea mays*.

RESUMO GRÁFICO



INTRODUÇÃO

No cenário mundial, o milho (*Zea mays* L.), é um dos principais cereais cultivados, onde os três maiores produtores são Estados Unidos, China e Brasil (Oliveira et al., 2020). No Brasil, o milho é cultivado em duas safras (verão e safrinha), alcançado na última safra (2021/22) uma das maiores produções totais do país, com aumento de 44% comparado à safra anterior (CONAB, 2022).

Parte desta produção é colhida no Cerrado brasileiro, que possuem solos de baixa fertilidade natural, com baixos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} trocável e por isso são ácidos, com alta toxidez por alumínio e manganês (Centurião et al., 2021; Miranda et al., 2022). Estes solos são pobres em fósforo disponível e total devido ao material de origem e por serem muito intemperizados, na fração argila predominam minerais caulinita e óxidos de ferro e alumínio, e conseqüentemente apresentam alta capacidade adsorção de P (Borges, 2018). Para a correção dos valores de P encontrados nesses solos é necessário o melhor entendimento de doses e fontes de adubos fosfatados, que atendam ao custo e benefício ao produtor. Entretanto, atualmente os fertilizantes fosfatados apresentam alto custo para a produção e requerem meios que favoreçam a maior eficiência do seu uso.

O uso eficiente de fertilizantes na agricultura é o foco principal das pesquisas no Cerrado, um deles tem sido fósforo (P) (Vitorino et al., 2020). O P é essencial na produção e distribuição de energia nas plantas. Na cultura do milho, apesar das exigências serem inferiores ao N e K, é o nutriente mais aplicado, porém o menos exportado. Isto ocorre devido às altas doses de fertilizantes para atingir o nível crítico da cultura, e os solos serem um forte dreno de P, resultando na baixa eficiência da adubação fosfatada (Almeida, 2019).

Os microrganismos desempenham papel primordial na ciclagem de fósforo no solo, com a capacidade de transformar o fósforo insolúvel em formas solúveis e acessíveis às plantas (Owen et al., 2015). Recentemente a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), lançou o inoculante BiomaPhos®, primeira tecnologia

nacional para a solubilização de fosfato. O BiomaPhos® é composto pelas cepas BRM 119 (*Bacillus megaterium*) e BRM 2084 (*Bacillus subtilis*) aplicadas no tratamento de sementes ou no sulco de plantio (Lima, 2022). Esta tecnologia tem capacidade de mineralizar e solubilizar fosfato herdado da adubação fosfatada das safras anteriores (também conhecido como *legacy P* — quantidade residual de fósforo retido no solo (Zhu et al., 2018)). O produto é composto pelas cepas BRM 119 (*Bacillus megaterium*) e BRM 2084 (*Bacillus subtilis*) aplicadas no tratamento de sementes ou no sulco de plantio (Lima, 2022).

Esta tecnologia é muito promissora, com grande potencial de uso em larga escala devido ao seu baixo custo, ser sustentável e por explorar um recurso presente nos solos agrícolas (*legacy P*). Porém, ainda existem muitas lacunas a serem preenchidas para melhor posicionamento, principalmente sua associação com fontes fosfatadas de distinta solubilidade. O objetivo foi avaliar o desenvolvimento e nutrição inicial do milho e atributos químicos do solo após inoculação de BiomaPhos® associados a fontes de adubo fosfatado solúvel e de baixa solubilidade.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido em casa de vegetação no Departamento de Ciência do Solo da ESALQ/USP, Piracicaba - SP (22° 43' 30" S e 47° 38' 51" W). O clima é do tipo subtropical úmido mesotérmico, "Cfa", a temperatura média dos meses mais quentes é de 35 °C e nos mais frios de 4 °C, com regime de precipitação anual de 1275 milímetros (Alvares et al., 2013).

O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, disposto em um esquema fatorial (2x2), com seis repetições. Duas fontes de P foram o primeiro fator (superfosfato triplo — 14% de P_2O_5 e 10% de Ca; e fosfato natural reativo OCP Marrocos — 27% de P_2O_5 28% de Ca) aplicados na dose de 100 mg kg^{-1} de P_2O_5 solúvel; e o segundo fator a inoculação ou não do BiomaPhos® (cepas BRM 119 e BRM 2084, 4 x10⁹ UFC mL⁻¹). A cultura foi o milho (*Zea mays*), cultivar BRS 3042.

Tabela 1. Análise do solo antes da instalação do experimento.

Tratamento	pH CaCl ₂	P mg dm ⁻³	Al	H+Al	SB	CTC
			-----cmol _c dm ⁻³ -----			
Solo TSP	4,4	1,9	0,9	6,8	2,0	8,8
Solo FNR	4,4	3,7	0,9	6,4	2,0	8,4

O solo utilizado no experimento foi um Latossolo Vermelho, coletado (0-20 cm) em duas áreas de lavoura soja/milho cultivados durante 17 anos, a primeira área com aplicação de superfosfato triplo (TSP) e a segunda área com fosfato natural reativo (FNR), ambas com 35% de argila (Tabela 1)

O solo coletado foi seco ao ar e passado em peneira de malha 2,0 mm (TFSA) (Teixeira et al., 2017). Em seguida, foi corrigido com óxido de cálcio e magnésio (reagentes PA), com o método de saturação por bases a 70%. Em seguida foram incubados por sete dias a 70% da capacidade de campo para a dissolução e correção do pH. Após a incubação, os fertilizantes TSP e FRN foram macerados e aplicados de forma homogênea em todo volume de solo. As unidades experimentais foram compostas por vasos com 5 dm⁻³ de solo. A aplicação de ureia e cloreto de potássio foram realizadas conforme as recomendações da cultura (Raij et al., 2001).

A inoculação do BiomaPhos® foi realizada no momento da semeadura do milho, com aplicação via semente. Foram semeadas seis sementes por vaso, posteriormente realizando o desbaste para manter apenas duas plântulas bem estabelecidas em cada vaso. A dose de inoculante BiomaPhos® foi seguida de acordo com recomendações do fabricante (200 mL para cada 100 kg⁻¹ de sementes). Durante todo ensaio a umidade foi mantida aproximadamente a 70% da capacidade de campo e com aferições 2 vezes ao dia com auxílio de uma balança digital.

Variáveis avaliadas

Aos 45 dias após a emergência (DAE), no estágio V6 do milho, ao final do experimento, foram realizadas as avaliações. Altura de plantas (ALT) foi avaliada com o auxílio de uma régua graduada em centímetros, medindo-se da base da planta até a ponta das folhas. Em seguida, separou-se parte aérea do milho da parte radicular para determinação da massa da matéria seca e teores de nutrientes foliares.

Para determinação da massa da matéria seca, a parte aérea (MSPA) e o sistema radicular (MSR) foram lavados e submetidos à secagem em estufa com circulação de ar forçada de ar, com temperatura de 65 °C, durante o período de 72 horas. Em seguida, pesadas para determinação da biomassa da parte aérea e radicular. A relação parte aérea raiz foi calculada a partir da divisão da MSPA pela MSR.

Após a secagem e pesagem da parte aérea, foi submetida à moagem em moinho do tipo Willey equipado com peneira com crivos de 1 mm, para as análises dos teores foliares de fósforo e nitrogênio (Malavolt; Vitti; Oliveira, 1997). O teor de proteína bruta (%) foi obtido após multiplicação do teor de N foliar por 6,25 (Tedesco et al., 1995). A absorção de P foi obtida com a multiplicação do teor de P foliar pela biomassa aérea das plantas (Silva et al., 2000).

O solo amostrado foi coletado para determinação de matéria orgânica do solo (MO), pH e P disponível. Nas amostras foi determinado o P disponível com resina aniônica esférica, pH em CaCl₂, relação 1: 2,5 de solo: solução e MO via oxidação úmida com dicromato de potássio (Teixeira et al., 2017).

Análise estatística

A normalidade (Shapiro-Wilks) e homoscedasticidade da variância (Bartlett) foram verificadas para cada variável, quando não atendidos esses pressupostos foram aplicados a transformação Box-Cox. Em seguida, os dados foram avaliados por análise de variância (ANOVA, $p \leq 0,05$), e as médias comparadas pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$), desdobrando os fatores quando houve interação significativa. O mapa de calor (*heatmap*) clusterizado foi utilizado para quantificar dissimilaridade nas variáveis e interação das fontes com o BiomaPhos®. Todas as análises e gráficos foram realizadas com auxílio do programa R versão 4.1.0.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A interação de fontes de P com BiomaPhos® (P x I) alterou ($p \leq 0,05$) as características planta-solo até o estágio V6 do milho (45 DAE), não apresentando diferença significativa para as variáveis: altura das plantas (ALT), proteína bruta (PB), P disponível (P-resina) e matéria orgânica do

solo (MO) que apresentam apenas efeitos simples (Tabela 2). A altura média das plantas (Figura 1-A), com superfosfato triplo (SFT) foi 92 cm, ~12 cm maior ($p = 0.0014$) em comparação ao fósforo reativo natural (FNR). Já o BiomaPhos®, promoveu aumento de ~10 cm comparado ao controle (91,5 vs 81,5 cm, $p = 0.006$).

Tabela 2. Análise de variância (ANOVA) das variáveis estudadas.

F.V	Bloco	Fontes (P)	Inóculo (I)	P*I	Resíduo	Total	CV (%)
GL	5	1	1	1	15	23	
ALT.	65,78 ^{ns}	903,30*	583,92*	52,05 ^{ns}	59,21	119,84	8,89
DC	09,76*	19,72*	0,07 ^{ns}	15,24*	1,84	4,84	8,10
MSR	9,84 ^{ns}	145,92*	0,01 ^{ns}	1039,75*	10,31	60,41	10,30
MSPA	13,14 ^{ns}	678,97*	12,03 ^{ns}	49,54*	5,74	38,79	5,75
RPAR	0,02 ^{ns}	0,07 ^{ns}	0,01 ^{ns}	1,48*	0,56	2,23	13,89
MST	15,66 ^{ns}	1535,7*	8,20 ^{ns}	1460,50*	15,73	144,30	5,48
Pfo	0,01*	0,11*	0,001 ^{ns}	0,04*	0,002	0,01	3,05
PB	0,75 ^{ns}	10,58*	0,44 ^{ns}	2,84 ^{ns}	0,68	1,21	4,61
AP	60,06 ^{ns}	1059,35*	13,41 ^{ns}	516,79*	37,11	106,35*	8,27
P-resina	19,04 ^{ns}	230,96*	13,32 ^{ns}	0,14 ^{ns}	10,34	21,51	8,44
pH	0,02 ^{ns}	0,002 ^{ns}	0,17*	0,17*	0,02	0,03	3,09
MO	2,23 ^{ns}	10,44*	23,50*	4,30 ^{ns}	1,15	2,89	2,64

GL: graus de liberdade; CV: coeficiente de variação; ALT: Altura das plantas; DC: diâmetro do colo; MSR e MSPA; Massa seca da raiz e da parte aérea; RPAR: Relação parte aérea com a raiz; MST: massa seca total; Pfo: P foliar; PB: proteína bruta; AP: absorção de P. P-resina: P disponível; MO: matéria orgânica do solo; *significativo a 5% de probabilidade ($p < 0,05$); ns: não significativo ($p > 0,05$).

Houve forte interação da fonte P x BiomaPhos® para o diâmetro do colo ($p = 0.00004$), ou seja, o efeito do BiomaPhos® no diâmetro do colo depende da fonte de P utilizada. Neste caso, foi observado que o SFT na ausência do BiomaPhos® (SFT-controle) proporcionou maior DC das plantas do milho. Entre as fontes, a inoculação do BiomaPhos® não alterou o diâmetro do colo ($p = 0.7831$), porém foi superior comparado ao tratamento com FN controle ($p = 0.045$) (Figura 1-B).

As respostas na massa seca da raiz (MSR) foram fortemente alteradas pela combinação de Fonte de P x BiomaPhos® (Figura 1C). Em relação ao uso do SFT, verificou-se redução no incremento de ~33%, porém o inverso ocorreu para FN, onde a inoculação promoveu aumento de ~59%. Verificou-se que o FN sem BiomaPhos® na MSR foi menor, resultado da interação da menor disponibilidade do P e a presença dos microrganismos, mostrando a importância da inoculação dos microrganismos quando se aplica uma fonte de P de baixa

solubilidade. Mas o tratamento só com adubação com SFT não difere do tratamento FN com BiomaPhos®.

A raiz é o *hotspots* e o principal ponto simbiótico das plantas com a comunidade microbiana do solo. O seu aumento tem íntima relação com maior absorção de P, devido explorarem mais regiões ricas em P do solo (Lambers, 2022). A evidência encontrada com FNR (fonte de P com baixa solubilidade) na raiz indica fortemente que houve modulação da rizosfera da cultura pelo BiomaPhos®, e apenas nesta fonte houve promoção de crescimento da raiz. A redução da MSR em SFT (fonte com P totalmente solúvel) evidencia que os benefícios dos microrganismos para as plantas não vêm sem custo. Pois é na rizosfera onde ocorre o “*trade-Off*” (troca de nutrientes) de carbono (exsudatos radiculares da planta) e sinais pela prestação dos serviços microbianos com a planta, por exemplo, mineralização e solubilização de P do solo (Wang et al., 2022).

Os resultados encontrados por Oliveira et al. (2020) também indicam a viabilidade da inoculação com *Bacillus*. Em condições de campo, tanto *B. megaterium* como *B. subtilis* incrementaram significativamente a produtividade de milho em diferentes anos de cultivo em duas condições de solo, sendo um incremento de 13,7% na produtividade em solo com baixo teor de P e de 6,5% em solo com alto teor de P.

Para a massa seca da parte aérea (MSPA) as plantas com SFT e SFT+BiomaPhos[®] não apresentaram diferença, onde acumularam mais biomassa quando comparado aos tratamentos com FN (Figura 1D). Pode ser observado um bioestímulo de ~13% com FN+BiomaPhos[®] comparado a FN-controle, evidenciando uma possível solubilização de P e promoção de crescimento na planta. O aumento da biomassa aérea evidencia que houve maior suprimento de P, uma vez que é fundamental em todos os principais processos metabólicos das plantas, como fotossíntese, transferência de energia, transdução de sinal, biossíntese de moléculas e respiração (Lambers, 2022).

A maior RPAR foi no SFT+BiomaPhos[®], com 1,72 g g⁻¹, ~44% a mais que no SFT-controle (1,19 g g⁻¹) (Figura 2A). Isso mostra que as plantas obtêm maior desenvolvimento na parte aérea do que nas raízes. No entanto, SFT-controle proporcionou maior produção de biomassa tanto em folhas quanto em raiz, comprovado pela Figura 2B. A RPAR da fonte FN+BiomaPhos[®] (1,11 g g⁻¹) foi 65% menor que SFT+BiomaPhos[®] e 42% menor com FN-controle (1,57 g g⁻¹). Quando BiomaPhos[®] foi inoculado com FN as plantas investiram mais no crescimento da raiz do que na parte aérea, uma estratégia para aumentar a exploração de P no solo (Lambers, 2022).

O FN+BiomaPhos[®] proporcionou maior biomassa total (MST) da planta na ausência de inoculação, com médias de 72,86 e 56,09 g, respectivamente (Figura 2B). Já na fonte de SFT, notou-se resposta inversa, onde a ausência de inoculação dos microrganismos apresentou maior média em relação ao BiomaPhos[®], sendo 87,69 g e 73,26 g planta⁻¹.

O FN+BiomaPhos[®] proporcionou maiores valores de P foliar (1,88 mg kg⁻¹) em relação aos demais, e nos controles de ambas as fontes de P não houve diferença (Figura 2C). Esses resultados são explicados pelo aumento da “biodisponibilidade” de

P para as plantas com maior acúmulo nos tecidos, em decorrência do inoculante maximizar o aproveitamento e a absorção do fósforo do solo (Ribeiro et al., 2018; Sousa et al., 2021).

A absorção de P do milho foi influenciada pelos fatores ($p = 0,002$). Não houve resposta da inoculação do BiomaPhos[®] entre as fontes ($p = 0,55$), apenas com os controles dentro de cada fonte. Com FN (72,5 mg planta⁻¹) houve incremento de ~10 mg planta⁻¹ com BiomaPhos[®] vs controle, já em SFT houve redução de 7 mg planta⁻¹ com BiomaPhos[®] (Figura 3A). Para o P disponível, apenas houve efeito das fontes ($p = 0,0002$) onde FN apresentou $41 \pm 2,88$ mg dm⁻³ de P, 18% a mais comparado ao SFT ($35 \pm 3,96$ mg dm⁻³) (Figura 3B). Isto ocorreu porque, embora o SFT seja uma fonte de P mais reativa, apresentou alta concentração de fósforo solúvel prontamente disponível às plantas. Já o FN por possui baixa reatividade, porém com mais P total, pode ser solubilizado a longo prazo e disponibilizado gradualmente para a planta, e por isso em curto prazo apresenta baixa eficiência (Horowitz; Meurer, 2004).

Os efeitos das fontes podem ser explicados pelo conteúdo de P aplicado. Uma vez que foi fixado o P solúvel na recomendação, FN tem mais P total que pode ser solubilizado a longo prazo. Os resultados parecem contraditórios, por ocorrer respostas na absorção de P pela planta, mas não encontramos efeito no solo. Porém, nossa amostragem foi do “*Bulk soil*” (perfil do vaso) e não solo rizosférico, região onde a depleção de P ocorre ligeiramente mais rápido, e onde também se encontra maior riqueza de carboxilatos que modulam as trocas planta-microrganismo (Wang et al., 2022).

Em estudos futuros, recomendamos amostragem do solo rizosférico ou da rizobainha para identificar se estas diferenças são promovidas pelos microrganismos. Entretanto, em SFT+BiomaPhos[®] a concentração de P pela análise foliar e absorção pelas plantas não foi maior entre os tratamentos. Possivelmente, em decorrência do aumento nos teores de fósforo presente no solo, que pode reduzir a simbiose das bactérias nas raízes do milho. Ou a atividade inicial das bactérias inoculadas pode ter acidificado o meio mais rápido, chegando ao pH desfavoráveis ao desenvolvimento das bactérias, já que *Bacillus* se desenvolvem melhor em pH 5,0 a 7,0 (Mitter et al., 2021).

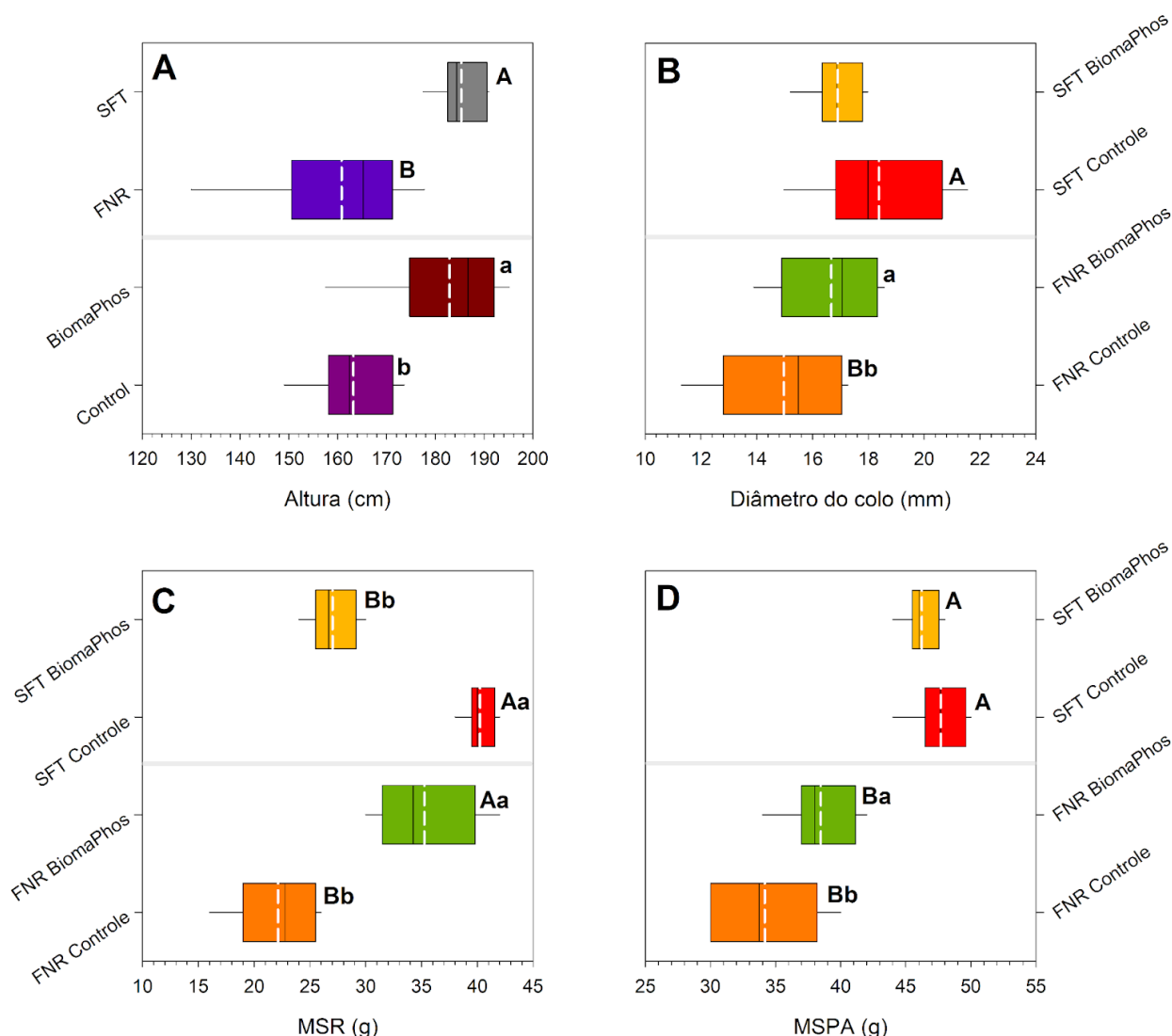


Figura 1. Altura das plantas (A), diâmetro do colo (B), massa seca da raiz (C) e parte aérea (D) após o cultivo do milho até V6 sob efeito de fontes fosfatadas e inoculação do BiomaPhos®. SFT: Superfosfato triplo; FN: fosfato natural. Diferentes letras maiúsculas para efeito das fontes e minúsculas para inoculação indicam diferença pelo teste *post-hoc* de Tukey ($p \leq 0,05$). Linha tracejada nas caixas indicam a média.

As plantas identificadas com a maior biomassa total apresentaram correlação negativa -0,68 com o teor de proteína bruta foliar e ligeiramente positiva com o P foliar (Figura 2D). O FN-controle teve uma diferença de ~12% de proteína bruta comparado ao SFT-controle, e apenas em FN houve influência significativa da inoculação do BiomaPhos®. O nitrogênio responsável por integralizar os aminoácidos, conhecidos por formarem as proteínas, pode ser encontrado na estrutura celular ou nas enzimas, consisti em um fator determinante quando se trata de gerar grãos com alto teor proteico (Penna-Neto, 2019; Basi et al., 2011).

O pH foi maior no solo com FN-controle, explicando porque as plantas de milho absorveram menos fósforo do que nos demais tratamentos, já que esta fonte se encontra mais solúvel em meio ácido (Figura 3C). Ou este efeito pode ser do próprio fosfato natural reativo que contém carbonatos em sua composição e durante a solubilização ocorre liberação de hidroxilas (OH⁻) aumentando o pH (Novais et al., 2007). A acidificação observada em FN+BiomaPhos® pode ser explicada pela ação dos microrganismos. Para solubilização de P os microrganismos utilizam diferentes estratégias, como a redução do pH do solo (com extrusão de H⁺), a quelação de fosfatos insolúveis pela produção de

ácidos orgânicos e inorgânicos, produção de sideróforos e a mineralização do fosfato orgânico (Kalayu, 2019; Prabhu et al., 2019), aumentando a absorção de P pelas plantas (Figura 3A). Estes mecanismos ocorrem na rizosfera das plantas, e os testes de P disponíveis de rotina sem amostragens direcionadas não detectam esta resposta (Figura 3B).

A matéria orgânica (MO) do solo é um *proxy* para eficiência dos microrganismos, pois pode servir como fonte direta de carbono para manutenção e ativação da atividade microbiana (efeito *priming*).

Porém, não apresentou fortes evidências para comprovar a interação do BiomaPhos[®] com as fontes fosfatadas ($p = 0,07$) na MO. FN apresentou maior teor de MO comparado ao TSP, podendo ser consequência do manejo dos anos anteriores da área ou do efeito *priming* negativo devido à oxidação da MO pela maior oferta de P disponível. O BiomaPhos[®] promoveu ligeiro aumento de 5%, considerando a possibilidade de ser a própria biomassa microbiana que tenha aumentado (embora não foi quantificada) (Figura 3D).

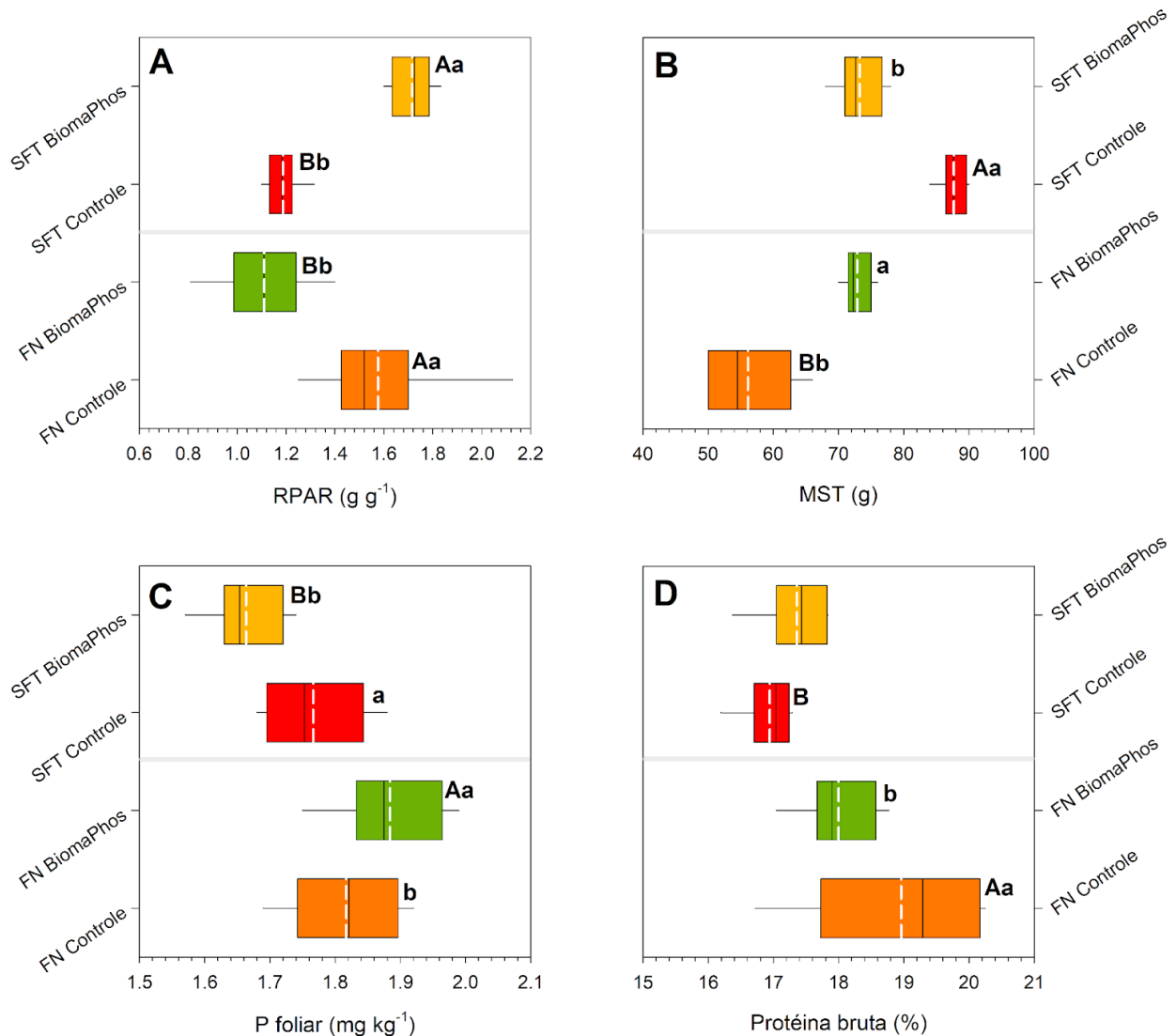


Figura 2. Relação parte aérea:raiz (A), massa seca total (B), teor de P (C) e proteína bruta (D) após o cultivo do milho até V6 sob efeito de fontes fosfatadas e inoculação do BiomaPhos[®]. SFT: Superfosfato triplo; FN: fosfato natural. Diferentes letras maiúsculas para efeito das fontes e minúsculas para inoculação indicam diferença pelo teste *post-hoc* de Tukey ($p \leq 0,05$). Linha tracejada nas caixas indicam a média.

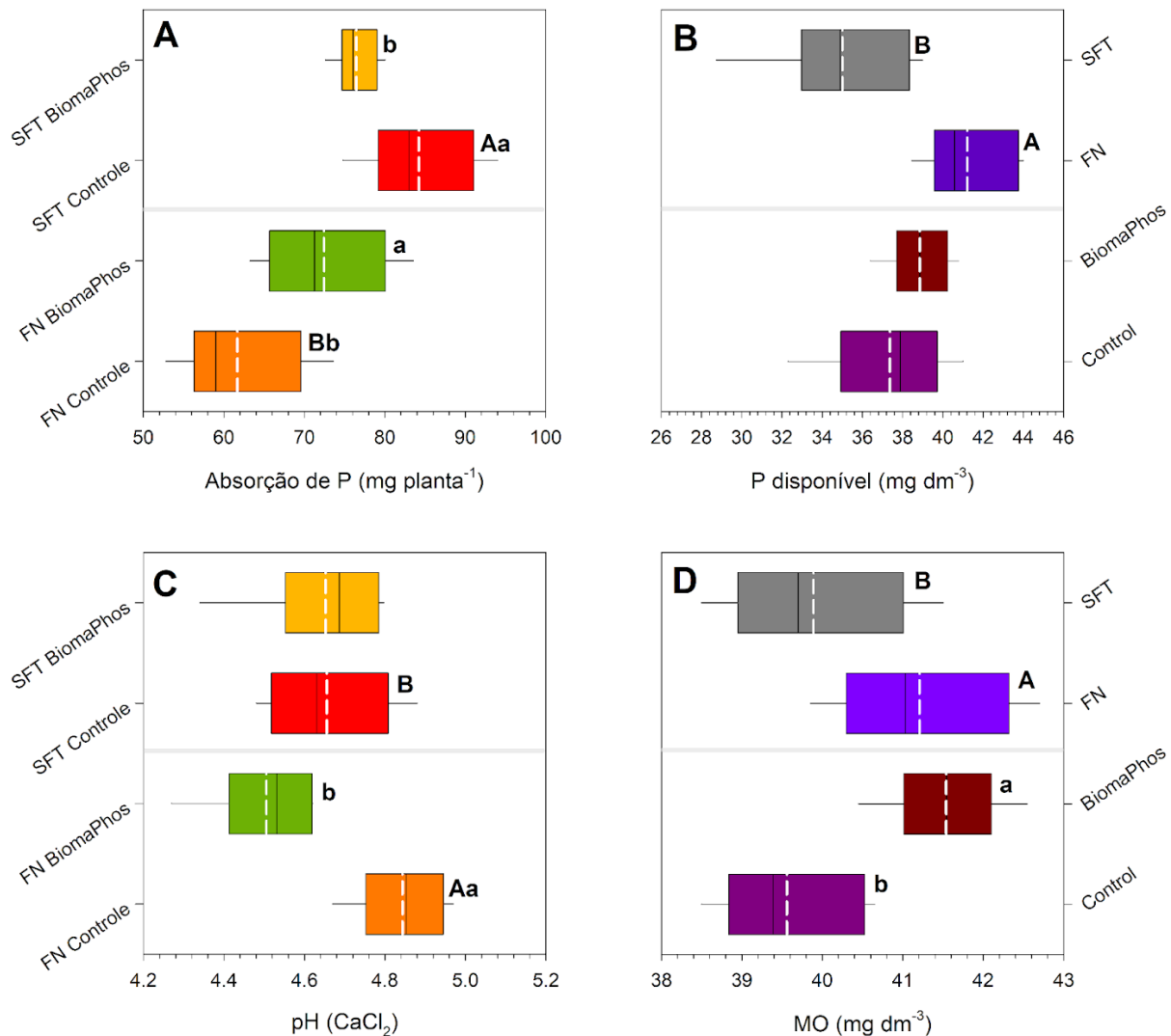


Figura 3. Absorção de P (A), P disponível (B), pH (C) e matéria orgânica do solo (D) após o cultivo do milho até V6 sob efeito de fontes fosfatadas e inoculação do BiomaPhos®. SFT: Superfosfato triplo; FN: fosfato natural. Diferentes letras maiúsculas para efeito das fontes e minúsculas para inoculação indicam diferença pelo teste post-hoc de Tukey ($p \leq 0,05$). Linha tracejada dentro das caixas indicam a média.

O mapa de calor clusterizado (Figura 4) classificou dois grandes grupos de tratamentos. Quatro das seis repetições de FN controle ficaram isoladas. No segundo grupo, ocorre subgrupo que engloba BiomaPhos® e controle do SFT como semelhantes. No segundo subgrupo todas as repetições do BiomaPhos® com FN e duas repetições do controle. De modo geral, as variáveis foram mais expressas positivamente com SFT, principalmente

nos controles, e no outro extremo (as menos expressivas as expressões) foram no controle de FN. Estes resultados sugerem que os microrganismos modulam o desenvolvimento do milho, principalmente quando associadas à adubação fosfatada de baixa solubilidade e seus efeitos são nulos ou negativos com fontes de P altamente solúveis.

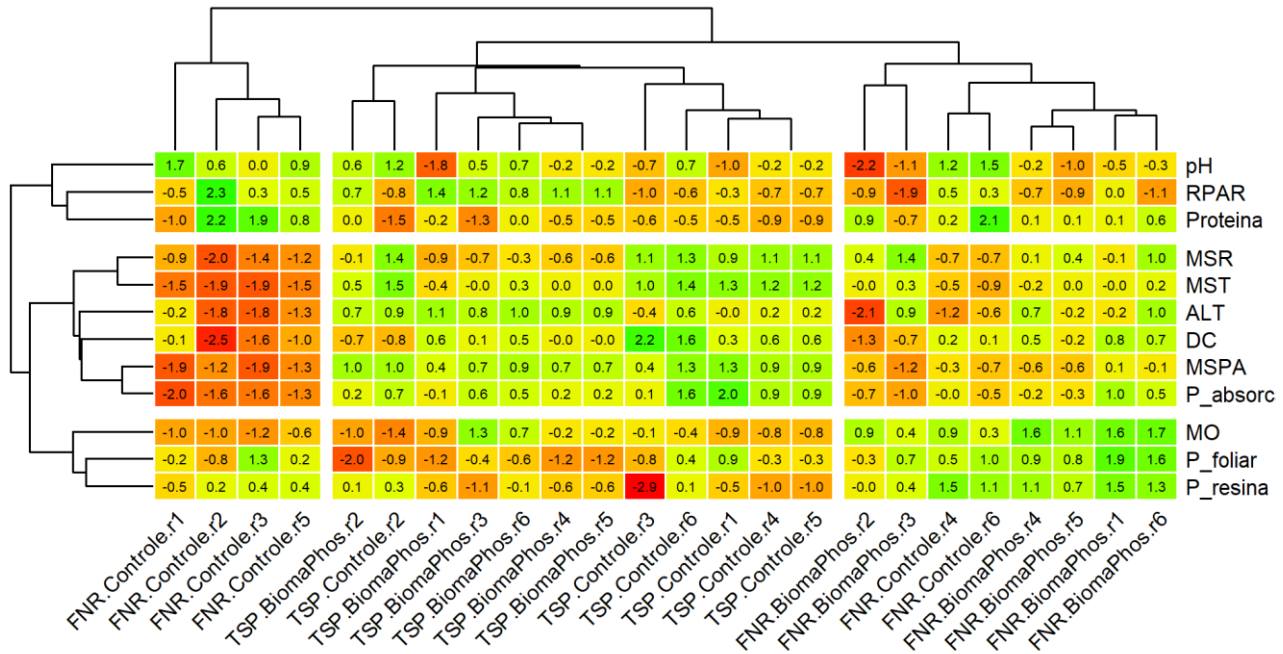


Figura 4. Mapa de calor (heatmap) clusterizado da expressão das características da planta solo sob o efeito de fontes fosfatadas e inoculação de BiomaPhos[®]. ALT: Altura das plantas; DC: diâmetro do colo; MSR e MSPA; Massa seca da raiz e da parte aérea; RPAR: Relação parte aérea com a raiz; MST: massa seca total; Pfo: P foliar; PB: proteína bruta; AP: absorção de P. P-RTA; P disponível; MOS: matéria orgânica do solo.

CONCLUSÃO

BiomaPhos[®] foi mais eficiente na fonte com baixa solubilidade (fosfato natural reativo) e isto modulou respostas positivas no acúmulo de biomassa, teor e absorção de P do milho até estágio V6. Porém, quando associado com fonte de alta solubilidade de P (superfosfato triplo), as respostas são nulas ou até mesmos prejudiciais nos primeiros estádios de desenvolvimento do milho.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Universidade Federal do Tocantins e a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio a LB, JL e HS.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almeida, A.F. (2019). **Desempenho agrônomo e eficiência de utilização de fósforo por cultivares de milho** (Tese de Doutorado em Fitotecnia). Universidade Federal Rural do Semi Árido, Mossoró-RN. p. 67.

Alvares, C.A.; Stape, J.L.; Sentelhas, P.C.; Gonçalves, J.L.M.; Sparovek, G. (2013). Köppen’s climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, 22(6), 711–728. DOI: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.

Basi, S.; Neumann, M.; Marafon, F.; Ueno, R.K.; Sandini, I.E. (2011). Influência da adubação nitrogenada sobre a qualidade da silagem de milho. **Applied Research & Agrotechnology**, 4(3). DOI: <https://doi.org/10.5777/paet.v4i3.1433>.

Borges, C.S. (2018). **Interação fósforo-silício-flúor em materiais de solo oxidico e uso benéfico de subproduto da indústria de fertilizantes fosfatados na soja**. Dissertação (Mestrado em Qualidade Ambiental) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia. 138 f.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. (2022). **Acompanhamento da safra brasileira de grãos – v.9 - safra 2021/22**, n.12 – Brasília: Conab, (2013-). Mensal. Disponível em: <http://www.conab.gov.br>.

- Centurião, N.C.; Ushiwata, S.Y.; Vilar, C. C.; Marimon Júnior, B.H.M. (2021). Efeitos de biochars (carvões) provenientes de diferentes materiais na fertilidade de dois solos do Cerrado. **Revista de Ciências Agroambientais**, 19(2), 70-80. DOI: <https://doi.org/10.30681/rcaa.v19i2.5135>.
- Horowitz, N.; Meurer, E.J. (2004). Eficiência agronômica de fosfatos naturais. **Fósforo na agricultura brasileira**, v. 2, p. 665-668,
- KALAYU, Girmay. (2019). Phosphate solubilizing microorganisms: promising approach as biofertilizers. **International Journal of Agronomy**.
- Lambers, H. (2022). Phosphorus Acquisition and Utilization in Plants. **Annual Review of Plant Biology**, 73(1). DOI:D <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-102720-125738>.
- Lima, A.P.A.D.; Buso, W.H.D. (2022). Uso de Biomafos no Tratamento de Sementes de Híbridos de Milho Cultivado na Safrinha. **Revista Mirante**. 15 (1), p.201-212. DOI: <https://doi.org/10.31668/mirante.v15i1.12799>.
- Malavolta, E.; Vitti, G.; Oliveira, S.A. (1997). **Avaliação do estado nutricional de plantas: princípios e aplicações**. 2.ed. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fósforo-Potafós.
- Miranda, T.M.; Buso, W.H.D. (2022). Aplicação foliar de BiomaPhos em milho safrinha. **Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento**, v. 11, n. 9. DOI: [10.33448/rsd-v11i9.31991](https://doi.org/10.33448/rsd-v11i9.31991).
- Mitter, E.K.; Tosi, M.; Obregón, D.; Dunfield, K.E.; Germida, J.J. (2021). Rethinking crop nutrition in times of modern microbiology: innovative biofertilizer technologies. **Frontiers in Sustainable Food Systems**. 5(1), 31. DOI:<https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.606815>.
- Novais, R.F.; Alvarez, V.H.; Barros, N.F.; Fontes, R.L.F.; Cantarutti, R.B.; Lima, J.C. (2007). **Fertilidade do solo** (1st ed., Vol. 1). Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.
- Oliveira, C.A.; Marriel, I.E.; Gomes, E.A.; Cota, L.V.; Santos, F.C.; Souza, S.M.; Lana, U.G.P.; Oliveira, M.C.; Mattos, B.B.; Alves, V.M.C.; Ribeiro, V.P.; Junior, R.V. (2020). Recomendação agronômica de cepas de *Bacillus subtilis* (CNPMS B2084) e *Bacillus megaterium* (CNPMS B119) na cultura do milho. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 18 p. **Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica**, 260.
- Owen, D.; Williams, A.; Griffith, G.; Withers, P. (2015). Use of commercial bioinoculants to increase agricultural production through improved phosphorus acquisition. **Applied Soil Ecology**, v. 86, p. 41-54, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2014.09.012>.
- Penna Neto, S. (2019). A Adubação Nitrogenada na Agricultura. Disponível em: <https://www.austertecnologia.com/single-post/nitrogenio-na-agricultura>.
- Prabhu, N.; Borkar, S.; Garg, S. (2019). Phosphate solubilization by microorganisms: overview, mechanisms, applications and advances. **Advances in Biological Science Research**, 161–176. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817497-5.00011-2>.
- Raij, B.; Andrade, J.C.; Cantarella, H.; Quaggio, J.A. (2001). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas, Instituto Agronômico. 285p.
- Silva, W.D.; Silva, A.D.; Sedyama, T.; Freitas, R.D. (2000). Absorção de nutrientes por mudas de duas espécies de eucalipto em resposta a diferentes teores de água no solo e competição com plantas de *Brachiaria brizantha*. **Ciência e Agrotecnologia**, 24(1), 147-159.
- Tedesco, M.; Gianello, C.; Bissani, C.; Bohnen, H. (1995). **Análises de solo, plantas e outros materiais** (2nd ed.). Porto Alegre, Brasil.: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Teixeira, P.C.; Donagemma, G.K.; Fontana, A.; Teixeira, W.G. (2017). **Manual de métodos de análise de solo** (3rd ed.). Rio de Janeiro: Embrapa Solos.

Vitorino, P.J.P.; Santos, E.N.; Rocha, J.L.A.; Marcelino, R.M.O.S.; Santos, L.C. (2020). Growth and phosphorus accumulation in corn under doses of root phosphate and phosphite via leaf. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 5, p. e76953120. DOI: 10.33448/rsd-v9i5.3120.

Wang, L.; Rengel, Z.; Zhang, K.; Jin, K.; Lyu, Y.; Zhang, L.; Shen, J. (2022). Ensuring future food security and resource sustainability: insights into the rhizosphere. **IScience**, 25(4), 104168. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.ISCI.2022.104168>.

Zhu, J.; Li, M.; Whelan, M. (2018). Phosphorus activators contribute to legacy phosphorus availability in agricultural soils: A review. **Science of the Total Environment**, 612, 522-537.