

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
BACHARELADO EM AGROECOLOGIA

**FERTILIZAÇÃO DO SOLO COM FOSFATO E BIOFERTILIZANTE LÍQUIDO
PARA O DESENVOLVIMENTO INICIAL DE PLANTAS DE MILHO**

LAURA ZANICHELLI

ARARAS, 2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
BACHARELADO EM AGROECOLOGIA

**FERTILIZAÇÃO DO SOLO COM FOSFATO E BIOFERTILIZANTE LÍQUIDO
PARA O DESENVOLVIMENTO INICIAL DE PLANTAS DE MILHO**

LAURA ZANICHELLI

Trabalho de Conclusão do Curso de
Bacharelado em Agroecologia apresentado ao
Centro de Ciências Agrárias para obtenção do título
de Bacharel em Agroecologia

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Dal’Ava Mariano

ARARAS, 2025

RESUMO

A predominância de Latossolos com baixo teor de fósforo (P) lábil no Brasil compromete o desenvolvimento das culturas agrícolas, exigindo o uso intensivo de fertilizantes minerais importados e de alto custo. Este estudo avaliou o potencial de um biofertilizante nacional na liberação de P não-lábil no solo, por meio da interação de microrganismos com o solo, visando reduzir a fertilização fosfatada e seu custo e os seus impactos ambientais. Um experimento foi conduzido em casa de vegetação por 35 dias, com milho (*Zea mays*) cultivado em vasos contendo 2 kg de solo e cinco doses de P (0, 115, 153, 306 e 410 mg/kg), com ou sem adição de biofertilizante, em delineamento inteiramente casualizado (DIC). As doses de P influenciaram significativamente o crescimento das plantas, resultando em maior altura e biomassa seca, destacando o papel fundamental do P no desenvolvimento vegetativo. O biofertilizante, por sua vez, teve efeito positivo sobre a condutância estomática (GSW) e a taxa de transpiração aparente (E_{apparent}) da planta, sugerindo estímulo ao metabolismo e ao equilíbrio hídrico das plantas. Embora a interação entre P e biofertilizante tenha sido, em geral, não significativa, há indicação de que os microrganismos possam contribuir para a tolerância a estresses, como o térmico, enfrentado durante o experimento. Esses resultados reforçam o potencial agrônômico do uso complementar de biofertilizantes no manejo sustentável do P.

Palavras-chave: Fósforo; Consórcio microbiano; Microrganismos solubilizadores de fosfato; Bioinsumo; Relação solo-planta; Milho; Nutrição; Fertilidade.

SUMÁRIO

	PÁGINA
1. LISTA DE FIGURAS	5
2. LISTA DE TABELAS	6
3. INTRODUÇÃO E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	7
4. OBJETIVOS	9
4.1. OBJETIVO GERAL	9
4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9
4.3. HIPÓTESE	9
5. MATERIAIS E MÉTODOS	10
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	21
7. CONCLUSÃO	29
8. IMPLICAÇÕES	30
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	31

LISTA DE FIGURAS

PÁGINA

1. Curva de pH do solo relacionado a quantidade de CaCO_3 utilizado para o tratamento	11
2. BL utilizado, identificado com a data de sua coleta na unidade de produção	13
3. Etapas da montagem do experimento	15
4. Vaso sendo pesado para irrigação e manutenção da umidade do solo	16
5. Vasos após o desbaste de plântulas em casa de vegetação	16
6. Aplicação em cobertura do biofertilizante líquido	17
7. Adubação em cobertura com N e K	18
8. Secagem das plantas pós-colheita em estufa de secagem	19
9. Medidas realizadas no decorrer do experimento	20
10. Altura de planta, em milímetros, medida em diferentes tempos de crescimento desde a emergência das plantas de plantas de milho cultivadas sob tratamentos resultantes da combinação entre doses de P e aplicação de biofertilizante	22
11. Peso da biomassa seca de plantas de milho, em gramas, medida após a colheita das plantas de plantas de milho cultivadas sob tratamentos resultantes da combinação entre doses de P e aplicação de biofertilizante	23
12. Efeitos do aumento de temperatura nas plantas de milho	24
13. Teores de clorofila a e b de plantas de milho, medida aos 35 DAE de plantas de milho cultivadas sob tratamentos resultantes da combinação entre doses de P e aplicação de biofertilizante	25
14. Variáveis de fotossíntese: GSW, E Apparent, PHIPS2, ETR e diferença de temperatura entre a folha da planta e a atmosfera, medidas aos 35 DAE de plantas de milho cultivadas sob tratamentos resultantes da combinação entre doses de P e aplicação de biofertilizante	26
15. Tendência linear das variáveis GSW e E apparent em função da aplicação de biofertilizante	28

LISTA DE TABELAS

1. Atributos químicos e físicos do solo utilizado no experimento 11
2. Doses de fosfato de cálcio e de P adicionadas ao solo 12
3. Análise de variância para as variáveis altura de planta (Alt) e biomassa seca (BS) de parte aérea da planta 21
4. Análise de variância para as variáveis Clorofila a e b e variáveis da fotossíntese 25

INTRODUÇÃO E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O fósforo (P) é um dos três macronutrientes principais para o bom desenvolvimento das plantas cultivadas, considerado um elemento fundamental em vários processos indispensáveis do metabolismo das plantas. Ele é um elemento fundamental na conversão da energia solar, gás carbônico, água e nutrientes minerais em alimentos, fibras e óleos pelas plantas, com função-chave na fotossíntese, metabolismo, armazenamento e transferência de energia, processos de transferência genética e celulares (Loureiro et al. 2005). Sua importância é tão expressiva que, quando em falta, os reflexos são visíveis em diversas funções metabólicas e características físicas das plantas. Fisiologicamente, ocorre uma diminuição na produção de ATP pelo organismo vegetal, que em casos mais drásticos, acarreta uma diminuição da produção de biomassa ou até mesmo ineficiência em ciclos essenciais como o de Calvin-Benson. Em relação às características físicas, sinais como coloração roxo-avermelhada e baixo crescimento são comuns (Bang et al., 2021).

Como podemos observar em Pereira et al. (2021), o P é um dos elementos mais estudados no Brasil, dada a sua dinâmica complexa e baixa disponibilidade em solos tropicais. Solos bastante intemperizados, aliados a altos teores de argila, possuem grande capacidade de adsorção de fosfatos, conseqüentemente, reduzindo sua disponibilidade para as plantas, isso devido a uma forte presença de oxi-hidróxidos de Fe e Al (Embrapa, 2018).

Ao levarmos em conta que o Brasil é o quarto maior produtor e segundo maior exportador de grãos do mundo e o maior produtor mundial de açúcar, sendo responsável por um terço da produção total do globo (Embrapa, 2021), mas possui solos pobres em P lábil devido à mineralogia deles (Van Raij, 2011), torna-se de fácil entendimento a necessidade de utilização de fertilizantes fosfatados e outros insumos para a manutenção da produção brasileira. Outro ponto relevante é que a produção interna de fertilizantes, de 2024 por exemplo, sendo de 7,2 megatoneladas (Mt) representou apenas 16% das necessidades do país, não sendo capaz de suprir por completo a necessidade de fertilizantes, tornando o país ainda muito dependente do mercado externo (ANDA, 2024).

As plantas absorvem apenas de 20% a 30% do P aplicado no solo no primeiro ano, o restante fica retido no solo em forma de P não-lábil e em 2018, um estudo realizado pela Embrapa, estimou que desde 1960 até o momento da pesquisa, 45,7 milhões de toneladas de P haviam sido aplicadas nos solos do Brasil, destes, 22,8 milhões de

toneladas continuam fixadas no solo (Embrapa, 2018). Em consequência do grande aporte de P ao solo, com o passar dos anos, foi sendo criado no solo, o chamado “Banco de Fósforo”. Acreditava-se anteriormente que tal banco era inacessível devido à forte adsorção do P pela fração coloidal do solo, especialmente pelos minerais da fração argila e pelos óxi-hidróxidos de Fe e Al. Esses componentes apresentam grupamentos como Fe-OH e Al-OH, que promovem quimissorção com os íons fosfato, resultando na imobilização do nutriente. Esse processo, comum em solos tropicais argilosos e intemperizados, reduz a disponibilidade do P para as plantas, o que explica por que grande parte do P presente no solo está em formas não lábeis (Broggi, 2004).

Com o aumento da discussão do emprego de insumos biológicos na agricultura, emergem questionamentos acerca de microrganismos capazes de acessar o “Banco de Fósforo” e tornar o elemento disponível para ser absorvido pelas raízes das plantas. Estudos como o de Mendes e Reis Júnior (2003) são exemplos de como o assunto virou pauta de discussão, tratando de como os microrganismos afetam direta e indiretamente a habilidade das plantas em adquirirem P do solo, seja pela sua ação no estímulo de crescimento do sistema radicular ou pelo deslocamento do equilíbrio de adsorção, que incrementa estímulos de processos metabólicos que são efetivos na solubilização e mineralização do P. Microrganismos como bactérias dos gêneros *Bacillus*, *Rhizobium*, *Pseudomonas* e *Agrobacterium* e fungos dos gêneros *Aspergillus* e *Penicillium* são apenas alguns dos microrganismos reportados como agentes solubilizadores de fosfatos (Florencio et al., 2022) e estão sendo cada vez mais estudados pela indústria e academia visando o desenvolvimento de produtos inoculantes biológicos para esse fim. Atualmente, no mercado nacional, já existem alternativas de produtos consolidados com o intuito de solubilização do “Banco de Fósforo” como o “BiomaPhos” da Bioma em parceria com a Embrapa, o qual possui as cepas: *Bacillus subtilis* e *Bacillus megaterium*, por exemplo.

Atualmente, biofertilizantes e inoculantes à base de microrganismos solubilizadores de minerais já são uma realidade cada vez mais consolidada na agricultura. Podemos observar em Oliveira-Paiva et al. (2022) uma extensa relação de produtos comerciais já lançados ao mercado, como o “PotaZ”, um solubilizador de potássio (K) à base de *Frateuria aurantia* fabricado na Índia e o “QuickRoots Technology”, cujo objetivo é aumentar a disponibilidade de P, K e nitrogênio (N), fabricado à base de *Bacillus amyloliquefaciens* e *Trichoderma*, nos Estados Unidos.

OBJETIVOS

OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho foi analisar o potencial dos microrganismos e metabólitos de um biofertilizante comercial no aproveitamento de P do solo por plantas jovens de milho medido através do crescimento e de variáveis da fotossíntese e estabelecer um protocolo de fertilização do solo com P e biofertilizantes para ensaios em vasos.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Medir o crescimento de plantas de milho em diferentes combinações de biofertilizante e dose de P aplicadas no solo;
- Calcular qual porcentagem da necessidade total de P o biofertilizante pode substituir;
- Analisar se o biofertilizante tem efeito positivo no desenvolvimento do milho com a dose máxima de P adicionada via adubação.

HIPÓTESE

O emprego do biofertilizante é capaz de substituir parte do fosfato adicionado através da adubação, devido ao deslocamento do P imobilizado nas partículas da fração argila do solo como resultado da interação do P não-lábil ali presente e os microrganismos e metabólitos do produto.

MATERIAIS E MÉTODOS

Um experimento foi conduzido em casa de vegetação do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de São Carlos - UFSCar/CCA, localizado na cidade de Araras, interior do estado de São Paulo, Brasil.

Material vegetal – Foi utilizado o híbrido de milho IAC 8390, um material intervarietal desenvolvido pelo Instituto Agrônomo (IAC), indicado tanto para a produção de grãos quanto para silagem. Esse híbrido apresenta plantas 26% mais altas que a média dos demais materiais, característica que, no entanto, não compromete sua estabilidade, uma vez que demonstra boa resistência ao acamamento e ao quebramento. Além disso, possui alta tolerância às principais doenças foliares do milho, com destaque para a ferrugem polissora, causada pelo fungo *Puccinia polysora*.

As sementes utilizadas na semeadura foram previamente selecionadas, visando à padronização de tamanho e à eliminação de sementes deformadas, muito pequenas ou quebradas, com o objetivo de minimizar interferências relacionadas à falta de uniformidade no estande de plantas.

Nos ensaios regionais conduzidos no Estado de São Paulo durante a safra 2009/2010, o IAC 8390 apresentou produtividade média de 8.714 kg/ha na região Sul e 8.326 kg/ha na região Noroeste, evidenciando bom desempenho agrônomo. Seus grãos são mais duros e com coloração alaranjada mais intensa do que os de outros materiais comerciais, e as folhas apresentam porte predominantemente semi-ereto e largura média, características que favorecem o manejo da cultura e o aproveitamento da radiação solar.

Solo – Foram utilizados 2 kg de solo por vaso para a condução do experimento e o solo utilizado, que foi coletado no município de Américo Brasiliense/SP, é um Latossolo Vermelho Escuro e seus principais atributos químicos e físicos estão apresentados na Tabela 1.

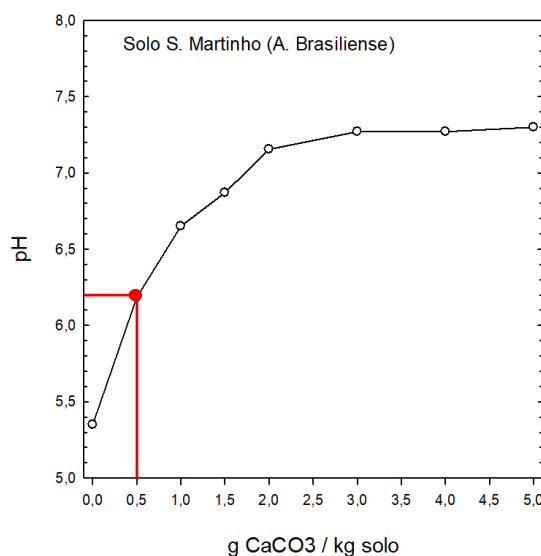
Tabela 1. Atributos químicos e físicos do solo utilizado no experimento

pH	M.O.	P	S	Ca	Mg	K	Al	H+Al	SB	CTC	V	m
	g/dm ³	mg/dm ³					mmol _c /dm ³				%	
5,5	19,4	14,5	<12	28,9	10,6	1,89	<0,1	22,2	41,4	63,6	65	0
	B	Cu	Fe	Mn	Zn	P-Rem						
			(mg/dm ³)			(mg/L)						
	0,14	0,6	6,4	1,9	0,3	26						
	Areia Grossa	Areia Fina	Areia Total	Silte	Argila	Classe de textura						
			(g/kg)									
	158	469	627	24	349	Média argilosa						

pH: Potencial Hidrogeniônico; M.O.: Matéria orgânica; P: Fósforo; S: Enxofre; Ca: Cálcio; Mg: Magnésio; K: Potássio; Al: Alumínio; H+Al: Acidez potencial (hidrogênio + alumínio trocáveis); SB: Soma de bases; CTC: Capacidade de troca catiônica a pH 7,0; V (%): Saturação por bases; m (%): Saturação por Alumínio; B: Boro; Cu: Cobre; Fe: Ferro; Mn: Manganês; Zn: Zinco; P-Rem: Fósforo remanescente.

Um teste de titulação da acidez do solo foi realizado para determinação da quantidade de carbonato de cálcio (CaCO₃) que deveria ser adicionada ao solo para alcançar o pH de 6,20. Foram utilizadas as doses de 0g, 0,5g, 1g, 1,5g, 2g, 3g, 4g e 5g de CaCO₃ por kg de solo. Porções de solo foram incubadas com as doses de CaCO₃ e com 10% de umidade (massa de água/massa de solo seco) por 30 dias. Depois deste período, o pH do solo foi medido em solução CaCl₂ 0,01 M conforme Raij et al. (2001). O resultado está apresentado na Figura 1, abaixo.

Figura 1. Curva de pH do solo relacionada à quantidade de CaCO₃ aplicada ao solo



Biofertilizante – Usualmente formulados com microrganismos benéficos vivos, como bactérias, fungos e/ou actinobactérias, capazes de promover a disponibilidade de nutrientes no solo. Em geral, apresentam concentrações variando de 10^7 a 10^9 unidades formadoras de colônias (UFC) por mL ou por grama do produto. Os grupos microbianos mais comuns incluem, por exemplo, bactérias solubilizadoras de fósforo como *Bacillus* e *Pseudomonas*, fixadoras de nitrogênio como *Azospirillum* e *Rhizobium*, microrganismos promotores de crescimento vegetal (PGPR), entre outras possibilidades. A composição exata varia conforme a finalidade do biofertilizante, mas todos carregam alta densidade de microrganismos viáveis e ativos.

Em relação ao biofertilizante utilizado, possui concentração em 10^9 e é composto por um consórcio microbiano advindo de três fontes de inóculo naturais.

Tratamentos experimentais – Os tratamentos originaram da combinação de dois fatores, doses de P e uso de biofertilizante líquido, conforme descrito a seguir:

- Fator doses de P** – Esse fator foi composto por cinco diferentes doses de P adicionadas ao solo na forma de fosfato de cálcio hidratado ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$). A relação da quantidade de P adicionada às doses pode ser observada na Tabela 2 a seguir. As doses de P foram definidas pela metodologia de Alvarez et al. (2000) para obtenção de curvas de resposta em ensaios em casa de vegetação, com base no valor de P-remanescente (P-rem) do solo. Para P-rem na faixa de 19 a 30 mg/L, que é o caso do solo em uso (Tabela 1), a dose máxima recomendada é de 410 mg/kg de P. Além da dose 0, usada como controle negativo, e da dose máxima (410 mg/kg), escolheram-se três doses intermediárias, 115, 153 e 306 mg/kg, para cobrir a faixa de variação entre as doses mínima e máxima e para termos neste experimento doses idênticas a doses empregadas em ensaios anteriores com fertilização com P no mesmo solo.

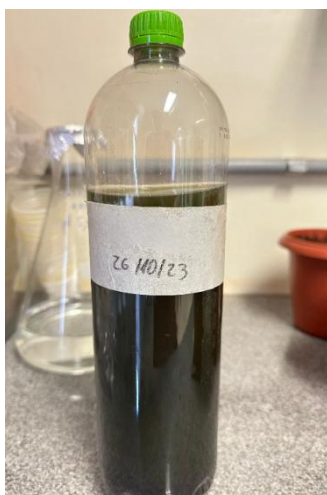
Tabela 2. Doses de fosfato de cálcio e de P adicionadas ao solo

DOSES	$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (g/Kg de solo)	P (mg/Kg de solo)
1	0	0
2	0,466	115
3	0,621	153
4	1,243	306
5	1,667	410

$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$: Fosfato de cálcio; P: Fósforo.

2. Fator uso de biofertilizante líquido (BL) – Em relação aos tratamentos com biofertilizante, foram definidos dois valores: sem biofertilizante e com biofertilizante. O produto utilizado foi coletado em outubro de 2023 na unidade de produção (Figura 2) e os tratamentos com o produto recebiam 50 ml do líquido em duas parcelas, 25 ml no momento da semeadura e 25 ml em cobertura 8 dias após a emergência das plantas. Considerando que em áreas de cultivo de milho há um estande de 55.556 plantas de milho por hectare (espaçamento entre linhas de 0,90 m e 5 plantas por metro linear) e que a dose de biofertilizante é de 150 L/ha em cada uma das duas aplicações recomendadas, cada planta receberia um volume de 2,7 ml por aplicação. Considerando que a aplicação das doses de P no solo mencionadas acima produziu nele uma concentração média de 196,8 mg/kg e que esta concentração é aproximadamente dez vezes a concentração de P que se teria no solo com a recomendação do Boletim 100 (Raij et al., 1997) para o solo em questão e uma produtividade esperada de 8 a 10 t/ha de grãos de milho, 90 kg/ha de P_2O_5 incorporados na camada superficial de 20 cm de espessura do solo (39,3 kg P/2.000.000 kg de solo = 19,65 mg/kg de P), optou-se por aplicar a dose de 25 ml/planta do biofertilizante líquido em cada aplicação que é aproximadamente dez vezes a dose aplicada em áreas comerciais.

Figura 2. Biofertilizante líquido utilizado, identificado com a data de sua coleta na unidade de produção



O experimento teve dez tratamentos (cinco doses de P e dois valores de BL) e três repetições, resultando em 30 parcelas, e foi realizado em delineamento inteiramente casualizado.

Montagem e condução do experimento – No momento da semeadura o solo já estava propício ao plantio, com pH corrigido. Após incubação com CaCO_3 , as porções de solos foram fertilizadas para o plantio com os seguintes nutrientes (em mg/kg) e respectivas fontes: 50 N- NH_4 e 97 S ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ e $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), 50 N- NO_3 e 150 K (KNO_3), 50 Mg (20 $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ e 30 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), 0,5 B (H_3BO_3), 1,5 Cu ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), 5,0 Fe (Fe-EDTA), 3,0 Mn ($\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), 0,1 Mo ($\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e 5,0 Zn ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$). Além da adubação inicial, foram realizadas duas fertilizações de cobertura aos 14 e 27 dias após a emergência (DAE) das plantas, aplicando-se 100 mL por vaso de uma solução contendo sulfato de amônio ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) e nitrato de potássio (KNO_3). Cada aplicação forneceu 75 mg/kg de potássio (K) e 50 mg/kg de nitrogênio (N), sendo este dividido igualmente entre as formas nítrica (NO_3^-) e amoniacal (NH_4^+), com 25 mg/kg de cada.

Foram abertos 5 sulcos de 4cm de profundidade em cada vaso, acomodando uma semente de milho por sulco. O fator BL foi aplicado com uma pipeta diretamente sobre a semente no fundo do sulco na dose de 5ml/semente de BL na variante com BL e 5ml/semente de água purificada na variante sem BL. Após esta aplicação, as sementes foram cobertas com o solo. No final da montagem, os vasos foram pesados e transferidos para a casa de vegetação, onde ficaram cobertos com plástico para evitar perdas de água nos primeiros dias e favorecer a germinação (Figura 3).

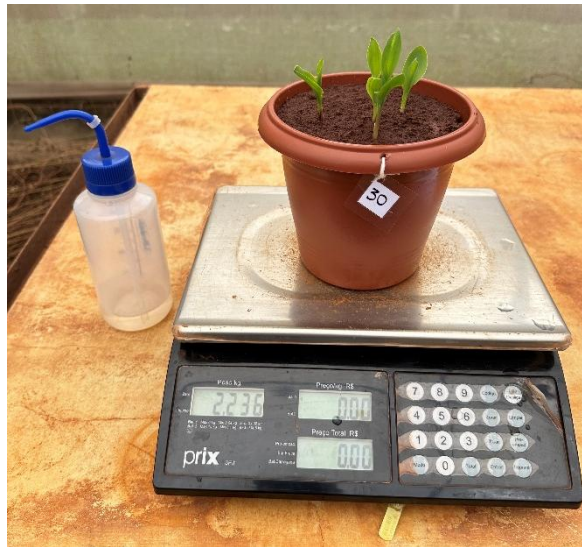
Figura 3. Etapas da montagem do experimento



- A) Sementes dispostas nos sulcos. B) Adição de água nos vasos com tratamento SEM BL. C) Sementes cobertas com solo após aplicação dos tratamentos. D) Vasos preparados. E) Vasos sendo pesados em casa de vegetação após irrigação. F) Vasos cobertos com plástico em casa de vegetação.

O peso medido de cada vaso no dia da semeadura foi usado como referência para as primeiras irrigações. Foi realizada uma média simples do peso dos 30 vasos e o valor encontrado serviu de base para as futuras irrigações, que começaram 4 dias após a semeadura. Diariamente os vasos eram pesados e a água era adicionada até atingir o peso médio de referência. As plântulas emergiram 6 dias após a semeadura.

Figura 4. Vaso sendo pesado para irrigação e manutenção da umidade do solo



A primeira ação realizada após a semeadura foi o desbaste, realizado 6 dias após a emergência (DAE) das plântulas. Nos vasos de cada dose de P, independente do uso de BL, foram selecionadas visualmente plantas com tamanho médio semelhante para serem mantidas enquanto as outras foram cortadas e retiradas, mantendo-se uma planta por vaso.

Figura 5. Vasos após o desbaste de plântulas em casa de vegetação



Com o crescimento das plantas, o peso médio utilizado como base para as irrigações foi sendo alterado, de forma empírica, de maneira a se considerar o incremento de peso da planta.

No 8º DAE, foi realizada a segunda aplicação do BL nos vasos de tratamento COM BL. Foram adicionados 25ml de BL em volta do caule da planta, na superfície do solo (Figura 6) e nos vasos do tratamento SEM BL foram adicionados 25ml de água purificada.

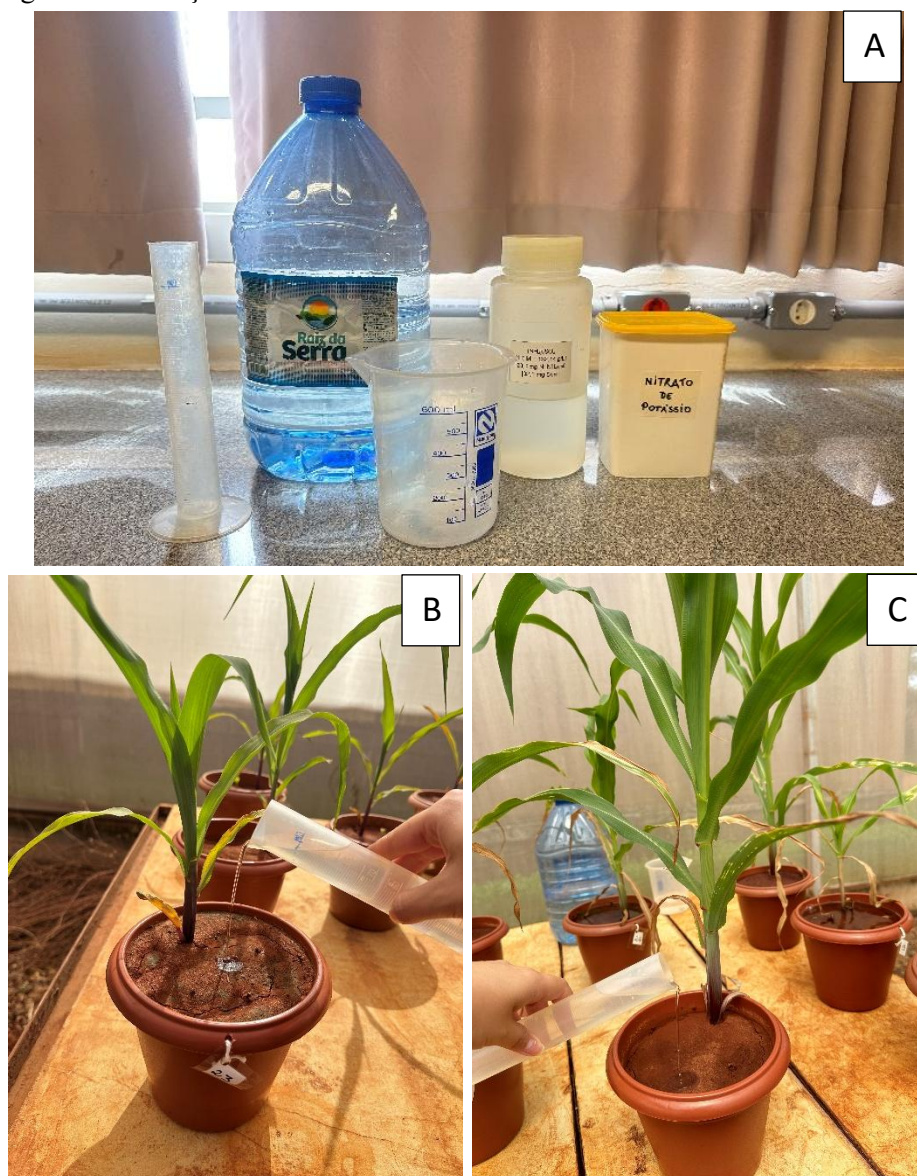
Figura 6. Aplicação em cobertura do biofertilizante líquido



Nos dias subsequentes à segunda aplicação de BL houve um aumento significativo da temperatura do ar, fator esse que nos fez aumentar o valor de referência da umidade do solo para irrigação com intuito de mitigar os efeitos da alta temperatura nas plantas.

Aos 14 DAE, foi realizada uma adubação mineral em cobertura em 100% dos vasos, ação esta que foi repetida aos 27 DAE, como pode ser observado na Figura 7.

Figura 7. Adubação em cobertura com N e K



A) Materiais utilizados para preparo da solução (da esquerda para a direita: proveta graduada 100ml, água destilada, bequer, sulfato de amônio e nitrato de potássio.). B) Adubação em cobertura aos 14 DAE. C) Adubação em cobertura aos 27 DAE.

Chegando ao final da condução do experimento, 34 DAE, houve a necessidade de realizar duas irrigações diárias, visto a necessidade de turgidez das folhas para a realização de uma análise prevista para o último dia.

No último dia de cultivo das plantas, 35 DAE, foi realizada a colheita da parte aérea das plantas, onde cada uma foi acondicionada em um saco de papel pardo identificado com a mesma numeração dos vasos. As plantas foram secadas em estufa de secagem a 65° C por 72h e em seguida pesadas para obtenção da biomassa seca (BS).

Figura 8. Secagem das plantas pós-colheita em estufa de secagem



A) Plantas de milho armazenadas em saco de papel pardo devidamente identificados; B) Sacos acomodados em estufa para secagem e obtenção do peso de parte aérea seca.

O experimento foi conduzido por 41 dias, do dia 26 de outubro de 2023 ao dia 05 de dezembro de 2023.

Medições – Durante toda a condução do experimento, foram realizadas medições de altura, com uma régua, a qual era posicionada na superfície do solo, pareando a medida “zero” com a superfície do solo. A medida considerou o último colar visível, da folha mais nova, e foi realizada em média a cada 7 dias, aos 6, 8, 14, 21, 28 e 35 DAE. Tal medida foi realizada sempre pela mesma pessoa para evitar diferentes interpretações da medida. A medida de clorofila a e b foi realizada com o equipamento “Clorofilômetro Digital – SoilControl”. Foi selecionado o terço médio da folha mais nova totalmente desenvolvida para posicionar o equipamento e fazer a leitura. Em cada indivíduo foram realizadas 3 leituras e o resultado considerado foi a média simples das 3 leituras obtidas. A medida de variáveis da fotossíntese foi realizada com o equipamento Li-600 (Li-COR), com o aparelho também posicionado no terço médio da folha mais nova totalmente desenvolvida para gerar os resultados. A medida foi realizada em torno das 10h da manhã, para favorecer uma diminuição de interferências externas. Foram analisadas variáveis como: GSW (Condutância Estomática à Água), que representa a taxa de liberação de vapor d’água pelos estômatos da folha; E Apparent (Taxa de Transpiração Aparente), que indica a taxa de perda de água na forma de vapor; PHIPSII (Eficiência Quântica do Fotossistema II), relacionada à fração da luz absorvida pela clorofila que é efetivamente

utilizada na fotossíntese pelo fotossistema II; ETR (Taxa de Transporte de Elétrons), que mede a velocidade com que os elétrons são transferidos durante o processo fotossintético; e Temperatura, que indica a diferença de temperatura da folha em relação a temperatura atmosférica no momento da medição. As medidas de clorofila a e b e as variáveis da fotossíntese foram realizadas aos 35 DAE.

Figura 9. Medidas realizadas no decorrer do experimento



A) Medida de altura; B) Medida de clorofila a e b; C) Medida de variáveis da fotossíntese; D) Medida de peso da BS.

Para a obtenção dos resultados, os dados colhidos em cada análise foram submetidos a uma análise de variância e ao teste de média Tukey com 5% de significância pelo aplicativo AgroEstat.

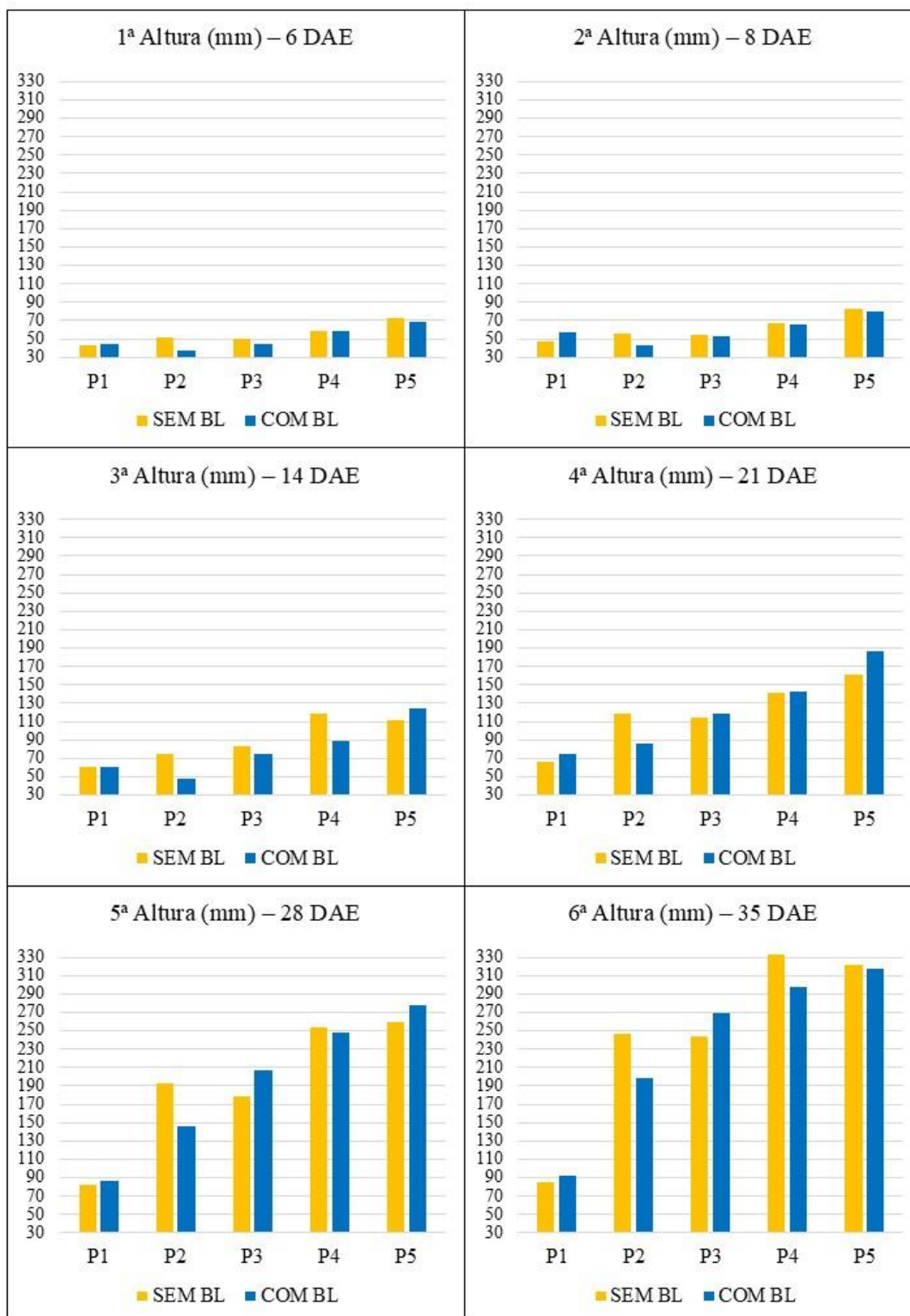
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Visto que a deficiência de P pode vir a causar problemas no desenvolvimento inicial de plantas de milho e conseqüentemente na sua produtividade (BRITO et al., 2014) foram analisadas variáveis desde os momentos iniciais após a emergência das plantas do solo até o último dia de cultivo delas. A análise de variância para altura de planta e biomassa seca da parte aérea revelou que houve efeito significativo simples somente do fator doses de P e não houve efeito significativo da interação dos fatores doses de P e biofertilizante (Tabela 3). A ausência de interação significativa indica que o efeito das doses de P é independente da aplicação do biofertilizante e vice-versa. Apesar desta ausência de interação significativa, os dados de altura e biomassa seca de planta estão apresentados separadamente para os dois valores do fator biofertilizante nas Figuras 10 e 11.

Tabela 3. Análise de variância para as variáveis altura de planta (Alt) e biomassa seca (BS) de parte aérea de plantas de milho cultivadas sob tratamentos resultantes da combinação entre doses de P e aplicação de biofertilizante

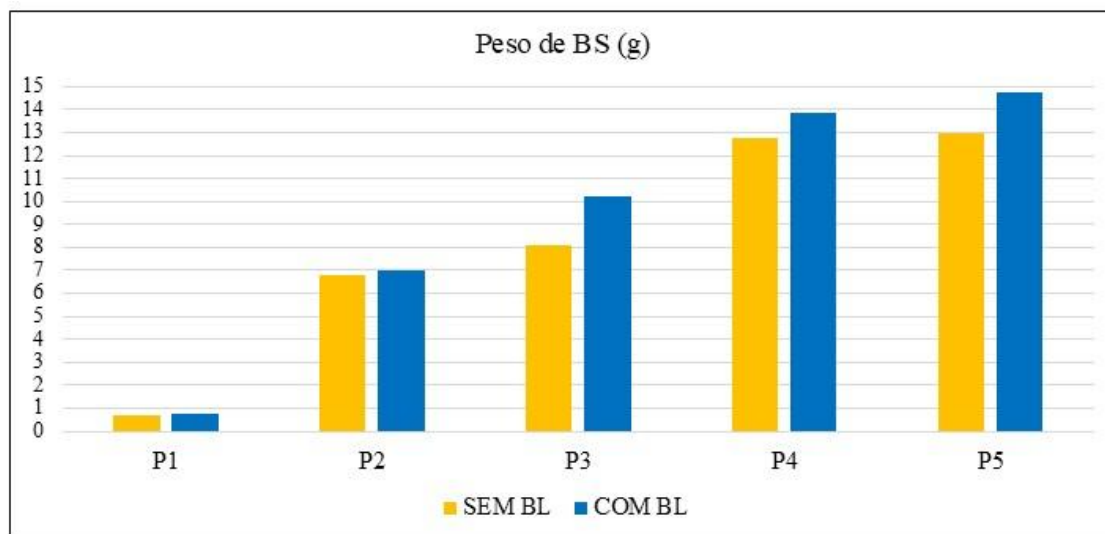
	Pr>Fc	Pr>Fc	Pr>Fc	Pr>Fc	Pr>Fc	Pr>Fc	Pr>Fc
	Alt 1 (6 DAE)	Alt 2 (8 DAE)	Alt 3 (14 DAE)	Alt 4 (21 DAE)	Alt 5 (28 DAE)	Alt 6 (35 DAE)	BS
Doses P (P)	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
Biofert. (BL)	0,1667	0,5093	0,0466	0,9211	0,9961	0,4380	0,2665
Interação PxBL	0,3966	0,1339	0,0835	0,4791	0,4748	0,4477	0,9309
CV (%)	14,17	11,70	16,30	22,56	19,15	15,74	28,76

Figura 10. Altura de planta, em milímetros, medida em diferentes tempos de crescimento desde a emergência de plantas de milho cultivadas sob tratamentos resultantes da combinação entre doses de P e aplicação de biofertilizante



P1 – Tratamento sem adição de P; P2 – Tratamento com adição de 115mg de P/kg de solo; P3 – Tratamento com adição de 153mg de P/kg de solo; P4 – Tratamento com adição de 306mg de P/kg de solo; P5 – Tratamento com adição de 410mg de P/kg de solo.

Figura 11. Peso da biomassa seca de plantas de milho, em gramas, medida após a colheita de plantas de milho cultivadas sob tratamentos resultantes da combinação entre doses de P e aplicação de biofertilizante



P1 – Tratamento sem adição de P; P2 – Tratamento com adição de 115mg de P/kg de solo; P3 – Tratamento com adição de 153mg de P/kg de solo; P4 – Tratamento com adição de 306mg de P/kg de solo; P5 – Tratamento com adição de 410mg de P/kg de solo.

O fornecimento de P teve efeito direto sobre o crescimento e a produção de biomassa seca das plantas de milho. Observou-se que, à medida que as doses de P aumentaram, houve acréscimo significativo na altura das plantas e na massa seca acumulada, indicando maior desenvolvimento vegetativo.

Esse resultado está alinhado ao papel fundamental de P nos processos metabólicos, como a fotossíntese, a divisão celular e a formação de estruturas radiculares mais robustas, que favorecem a absorção de água e nutrientes. De acordo com Otoni e Sousa (2024), o uso de fontes fosfatadas no sulco de plantio promove maior crescimento inicial do milho, especialmente quando se utilizam formas mais disponíveis de P, como o fosfato de cálcio. Além disso, os autores observaram aumento no diâmetro do colmo, variável não avaliada no presente experimento, mas que reforça ainda mais a associação entre o fornecimento adequado de P e o acúmulo de biomassa seca, uma vez que estruturas vegetativas mais desenvolvidas contribuem diretamente para o vigor geral da planta.

Tais evidências reforçam a importância do manejo adequado de P, sobretudo nas fases iniciais da cultura, em que o déficit desse nutriente pode comprometer o potencial produtivo da planta ao longo do ciclo.

Em decorrência de um aumento significativo da temperatura do ar durante o decorrer do experimento, algumas plantas sofreram danos em suas folhas (Figura 12), que podem ter acarretado a mudança dos resultados, visto que a ocorrência de estresse térmico em plantas de milho de primeira safra interfere no aumento da respiração noturna da planta e parte dos fotoassimilados que seriam direcionados para suprir energia para o crescimento são utilizados no reparo e manutenção do metabolismo da planta, o que, conseqüentemente, reduz o desenvolvimento e produtividade da cultura (Souza e Barbosa, 2015).

Figura 12. Efeitos do aumento de temperatura nas plantas de milho



Existe a hipótese de que com o uso de biofertilizantes e a atuação dos microrganismos aplicados com eles no sistema solo-planta, exista um estímulo ao desenvolvimento radicular, favorecendo a absorção de água e conferindo maior resistência das plantas aos estresses hídrico e térmico. Esta hipótese foi corroborada por Armanhi et al. (2021), que demonstraram que comunidades bacterianas sintéticas modularam a resposta do milho ao estresse hídrico, promovendo melhor desempenho fisiológico e controle estomático. Embora o foco do estudo tenha sido tolerância à seca, os mecanismos ativados envolvem rotas antioxidantes e hormonais também associadas à tolerância ao estresse térmico, indicando o potencial dos microrganismos na mitigação de diferentes estresses abióticos.

De acordo com a análise de variância para clorofila a e b e variáveis da fotossíntese, todas coletadas no 35º DAE, os resultados indicam que o P é o principal

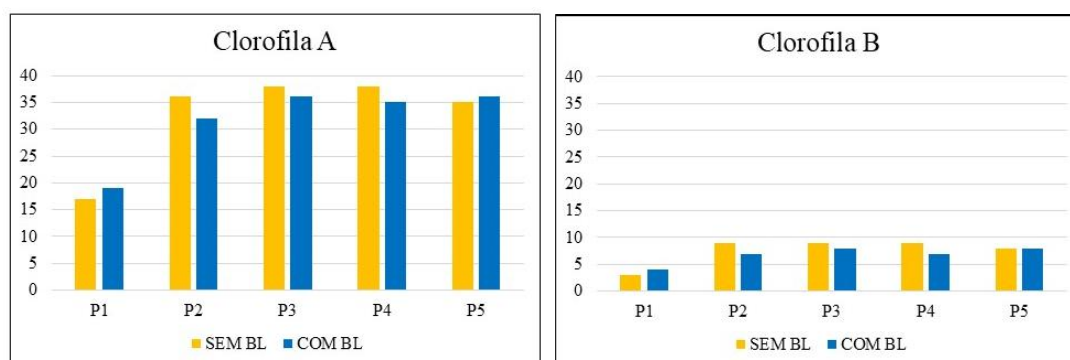
fator influente sobre as variáveis fisiológicas avaliadas, apresentando efeito significativo em todas as variáveis analisadas (Tabela 4 e Figura 13). Por outro lado, o biofertilizante mostrou um efeito mais limitado, com influência significativa apenas a taxa de transpiração e a condutância estomática. A interação entre o P e o biofertilizante também foi, em geral, pouco expressiva, com exceção da taxa de transpiração aparente, onde a combinação entre ambos os fatores apresentou significância estatística a 5%. Além disso, algumas variáveis apresentaram alta variabilidade, como a diferença de temperatura entre a folha da planta e a atmosfera, GSW e E Apparent, o que exige cautela na interpretação dos resultados e pode indicar a necessidade de ajustes metodológicos em experimentos futuros para reduzir possíveis ruídos experimentais, como pode ser observado na Tabela 4 abaixo.

Tabela 4. Análise de variância para as variáveis de Clorofila a e b e variáveis da fotossíntese: GSW, E Apparent, PHIPS2, ETR e Temperatura

	Pr>Fc Clorofila a	Pr>Fc Clorofila b	Pr>Fc GSW	Pr>Fc E Apparent	Pr>Fc PHIPS2	Pr>Fc ETR	Pr>Fc Temperatura
Doses P (P)	0,0001	0,0001	0,0046	0,0002	0,0001	0,0001	0,0028
Biofert. (BL)	0,3408	0,0810	0,0228	0,0130	0,5479	0,3626	0,1472
Interação PxBL	0,2694	0,3981	0,1065	0,0396	0,5119	0,4069	0,1453
CV (%)	9,37	18,78	55,26	47,26	28,00	29,65	68,54

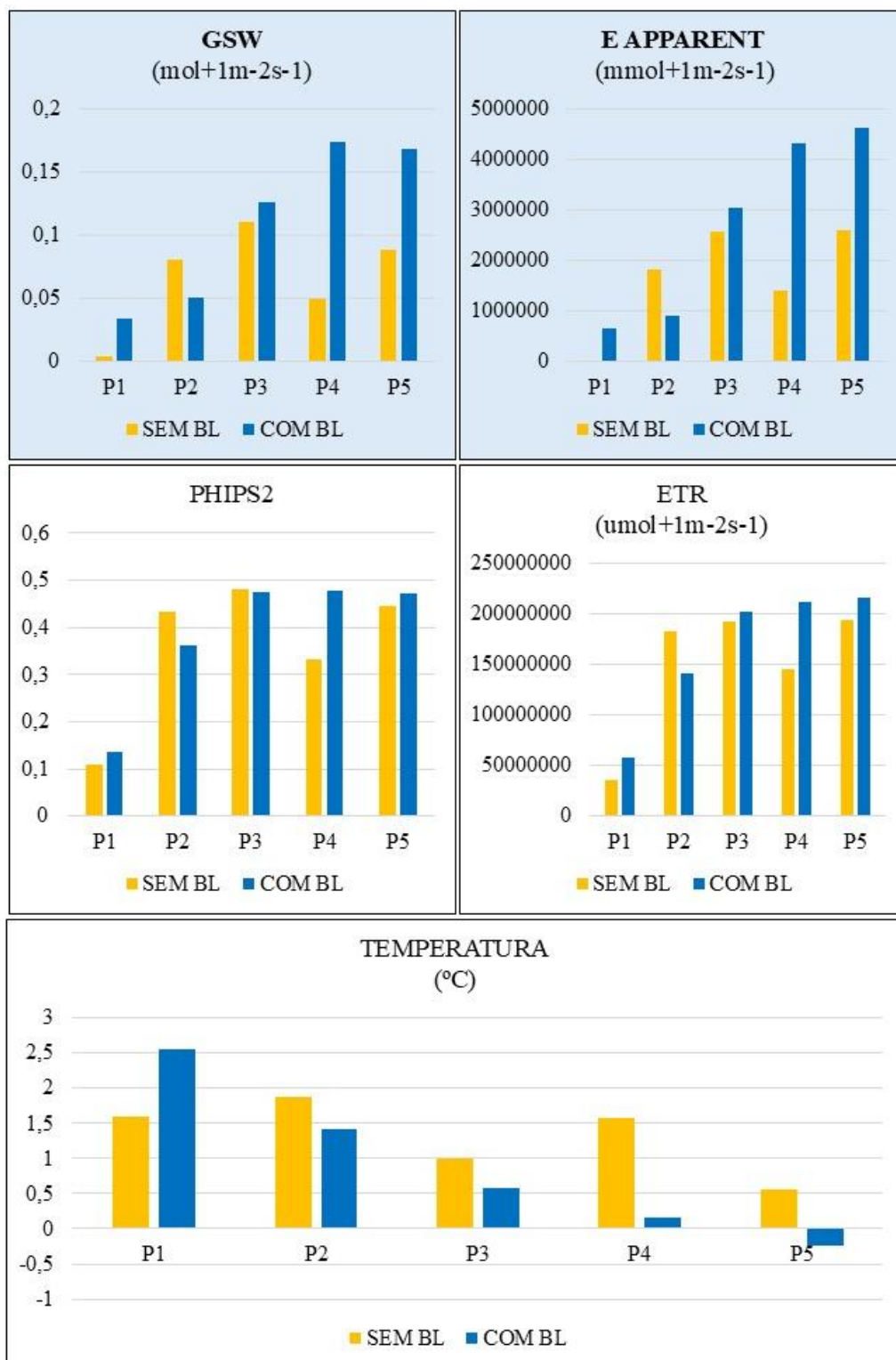
GSW: Condutância estomática à água; E Apparent: Taxa de transpiração aparente; PHIPS2: Eficiência quântica do fotossistema II; ETR: Taxa de transporte de elétrons; Temperatura: Diferença de temperatura entre folha e atmosfera.

Figura 13. Teor de clorofila a e b de plantas de milho, medido aos 35 DAE de plantas de milho cultivadas sob tratamentos resultantes da combinação entre doses de P e aplicação de biofertilizante



P1 – Tratamento sem adição de P; P2 – Tratamento com adição de 115mg de P/kg de solo; P3 – Tratamento com adição de 153mg de P/kg de solo; P4 – Tratamento com adição de 306mg de P/kg de solo; P5 – Tratamento com adição de 410mg de P/kg de solo.

Figura 14. Variáveis de fotossíntese: GSW, E Apparent, PHIPS2, ETR e diferença de temperatura entre a folha da planta e a atmosfera medidas aos 35 DAE de plantas de milho cultivadas sob tratamentos resultantes da combinação entre doses de P e aplicação de biofertilizante



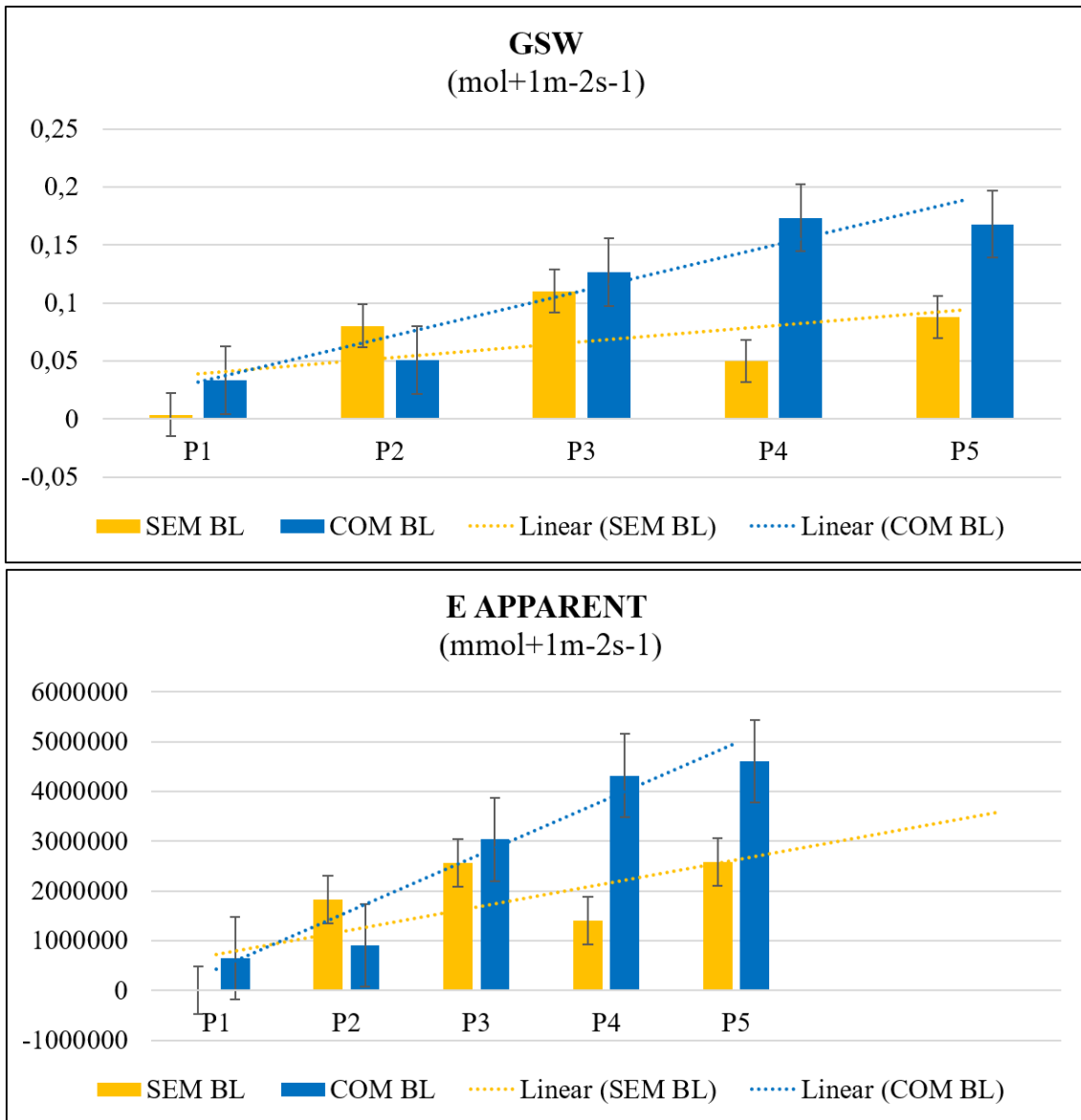
GSW: Condutância estomática à água; E Apparent: Taxa de transpiração aparente; PHIPS2: Eficiência quântica do fotossistema II; ETR: Taxa de transporte de elétrons; Temperatura: Diferença de temperatura entre folha e atmosfera.

O biofertilizante influenciou significativamente a condutância estomática (GSW) e a taxa de transpiração aparente (E_{apparent}), destacadas na Figura 14, indicando um possível efeito positivo sobre o funcionamento estomático das plantas de milho. Esse resultado sugere que os microrganismos presentes no biofertilizante podem ter promovido uma maior atividade metabólica, favorecendo o equilíbrio hídrico e a eficiência fisiológica da planta.

O aumento da GSW reflete uma maior abertura estomática, que por sua vez está diretamente relacionada à maior absorção de CO_2 e, conseqüentemente, maior taxa de fotossíntese. Já a elevação da taxa de transpiração aparente indica maior transpiração, o que pode ter sido resultado de um sistema radicular mais ativo e eficiente, capaz de manter a absorção de água do solo mesmo sob maior demanda evaporativa.

Esses efeitos são coerentes com a ação de consórcios microbianos, frequentemente associados à produção de fito hormônios, melhora na absorção de nutrientes e ao aumento da resistência fisiológica das plantas. Assim, o uso do biofertilizante pode ter contribuído para um ambiente rizosférico mais favorável, refletindo-se nas variáveis fisiológicas ligadas à troca gasosa. Esse comportamento também é evidenciado pela linha de tendência linear, na qual os tratamentos com biofertilizante apresentam desempenho superior em relação aos tratamentos sem a aplicação, como pode ser observado na Figura 15:

Figura 15. Tendência linear das variáveis GSW e E aparent em função da aplicação de biofertilizante



CONCLUSÃO

- P foi o fator dominante: O fósforo foi determinante para o crescimento e desempenho fisiológico das plantas, independente das combinações do biofertilizante e dose de P.
- Efeito complementar: Apesar da atuação dos microrganismos, principalmente em condições de baixo P, não é possível afirmar sua capacidade de substituir integral ou parcialmente a adubação fosfatada.
- Benefício do biofertilizante mesmo com dose máxima de P: O biofertilizante melhorou parâmetros fisiológicos, como a troca gasosa, mas não houve impacto em variáveis diretas de crescimento, como altura de planta e biomassa seca.

IMPLICAÇÕES

Embora os dados estatísticos não tenham indicado diferenças significativas entre os tratamentos, observações visuais sugerem que o biofertilizante apresenta potencial agrônomo relevante, especialmente em condições de estresse. Esse tipo de resposta, muitas vezes sutil, pode não ser captado com clareza em experimentos com número reduzido de repetições. O alto valor do coeficiente de variação reforça essa limitação, indicando grande variabilidade nos dados e, portanto, a necessidade de ampliar o número de repetições para aumentar o poder discriminativo do teste estatístico. Com um delineamento mais robusto, seria possível detectar efeitos mais discretos e consistentes do biofertilizante sobre as variáveis avaliadas.

Além disso, a inclusão de análises complementares pode contribuir significativamente para uma melhor compreensão da atuação do biofertilizante no solo. Avaliações como o teor de carbono da biomassa microbiana e a atividade enzimática ao longo do tempo oferecem uma visão mais detalhada sobre os mecanismos microbiológicos em jogo, permitindo correlacionar efeitos fisiológicos observados na planta com processos bioquímicos no solo. Outra estratégia promissora seria o parcelamento da aplicação do biofertilizante em mais parcelas, o que poderia potencializar seus efeitos ao manter a atividade microbiana estimulada por mais tempo, favorecendo a liberação gradual de nutrientes e a interação positiva com as raízes das plantas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVAREZ, V. V. H.; NOVAIS, R. F.; DIAS, L. E.; OLIVEIRA, J. A. **Determinação e uso do fósforo remanescente**. Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 25, p. 27–33, 2000.

ANDA – ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS. **Principais indicadores do setor de fertilizantes – 2024**. São Paulo: ANDA, 2024. Disponível em: <https://anda.org.br/wp-content/uploads/2024/09/Principais_Indicadores_2024.pdf> Acesso em: 05/05/2025.

ARMANHI, J. S. L.; DE SOUZA, R. S. C.; BIAZOTTI, B. B.; YASSITEPE, J. E. de C. T.; ARRUDA, P. **Modulating drought stress response of maize by a synthetic bacterial community**. Frontiers in Microbiology, v. 12, p. 747541, 2021.

BANG, T. C.; HUSTED, S.; LAURSEN, K. H.; PERSSON, D. P.; SCHJOERRING, J. K. **The molecular-physiological functions of mineral macronutrients and their consequences for deficiency symptoms in plants**. New Phytologist, v. 229, p. 2451–2454, 2021.

BRITO, C. F. B.; FONSECA, V. A.; BEBÉ, F. V.; SANTOS, L. G. **Desenvolvimento inicial do milho submetido a doses de esterco bovino**. Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável, Pombal, v. 9, n. 3, p. 244–250, jul./set. 2014.

BROGGI, F. **Adsorção e disponibilidade de fósforo em solos com diferentes composições mineralógicas**. 2004. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2004.

DIAS, C. **Brasil adicionou 22,8 milhões de toneladas de fósforo em seus solos nos últimos 50 anos**. Embrapa Solos, Rio de Janeiro, 30 abr. 2018. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/33747073/brasil-adicionou-228-milhoes-de-toneladas-de-fosforo-em-seus-solos-nos-ultimos-50-anos>>. Acesso em: 20/12/2024.

EMBRAPA SOLOS. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

FLORENCIO, C.; BORTOLETTO-SANTOS, R.; FAVARO, C. P.; BRONDI, M. G.; VELLOSO, C. C. V.; KLAIC, R.; RIBEIRO, C.; FARINAS, C. S.; MATTOSO, L. H. C. **Avanços na produção e formulação de inoculantes microbianos visando uma agricultura mais sustentável.** Química Nova, São Paulo, v. 45, n. 9, p. 1133–1145, 2022.

GUARALDO, M. C. **Brasil é o quarto maior produtor de grãos e o maior exportador de carne bovina do mundo, diz estudo.** Embrapa, Brasília, 01 jun. 2021. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/62619259/brasil-e-o-quarto-maior-produtor-de-graos-e-o-maior-exportador-de-carne-bovina-do-mundo-diz-estudo>>. Acesso em: 16/11/2024.

LOUREIRO, F. E. L.; MONTE, M. B. M.; NASCIMENTO, M. **Agrominerais-fosfato.** In: LUZ, A. B.; LINS, F. A. F. (org.). **Rochas & minerais industriais: usos e especificações.** Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2005. Cap. 7, p. 141-171.

MENDES, I. C.; REIS JUNIOR, F. B. **Microrganismos e disponibilidade de fósforo (P) nos solos.** Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2003. 16 p.

OLIVEIRA-PAIVA, C. A.; ALVES, V. M. C.; GOMES, E. A.; SOUSA, S. M. de; LANA, U. G. de P.; MARRIEL, I. E. **Microrganismos solubilizadores de fósforo e potássio na cultura da soja.** In: MEYER, M. C.; BUENO, A. de F.; MAZARO, S. M.; SILVA, J. C. da (ed.). **Bioinsumos na cultura da soja.** Brasília, DF: Embrapa, 2022. cap. 9, p. 163–179.

OTONI, S. I.; SOUSA, A. C. G. **Crescimento inicial do milho com diferentes fontes de fósforo no sulco de plantio.** Revista FT, v. 28, n. 130, p. 1–28, 2024.

PEREIRA, D. S.; COSTA, Y. K. S.; CARVALHO, L. B. **O elemento P: formas e dinâmica em solos tropicais.** Revista Agronomia Brasileira, Jaboticabal, v. 5, 2021.

SOUZA, G. M.; BARBOSA, A. M. **Fatores de estresse no milho são diversos e exigem monitoramento constante.** Visão Agrícola, Piracicaba, n. 13, jul./dez. 2015, p. 30–34.

VAN RAIJ, B. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes.** Piracicaba: IPNI, 2011. 420p.

VAN RAIJ, B.; ANDRADE, J. C. de; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. (Orgs.). **Análise Química para Avaliação da Fertilidade de Solos Tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas (IAC), 2001. 285 p.

VAN RAIJ, B.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (eds.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas (IAC), 1997. 285 p. (IAC. Boletim Técnico, 100).