



**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
DOUTORADO EM AGRONOMIA**

JULIANA BONFIM CASSIMIRO

**MANEJO DA ADUBAÇÃO FOSFATADA EM CANA-DE-AÇÚCAR: EFEITOS DE
FONTES DE FERTILIZANTES FOSFATADOS NA DINÂMICA DO FOSFÓRO EM
SOLO ARENOSO**

Presidente Prudente - SP
2024



**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
DOUTORADO EM AGRONOMIA**

JULIANA BONFIM CASSIMIRO

**MANEJO DA ADUBAÇÃO FOSFATADA EM CANA-DE-AÇÚCAR: EFEITOS DE
FONTES DE FERTILIZANTES FOSFATADOS NA DINÂMICA DO FOSFÓRO EM
SOLO ARENOSO**

Tese apresentada Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade do Oeste Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do título de doutora – Área de concentração: Produção Vegetal

Orientador: Prof. Dr. Carlos Sérgio Tiritan
Coorientador: Prof. Dr Reges Heinrichs

Presidente Prudente - SP
2024

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: "MANEJO DA ADUBAÇÃO FOSFATADA EM CANA-DE-AÇÚCAR: EFEITOS DE FONTES DE FERTILIZANTES FOSFATADOS NA DINÂMICA DO FÓSFORO EM SOLO ARENOSO"

630

C345m

Cassimiro, Juliana Bonfim.

Manejo da adubação fosfatada em cana-de-açúcar: efeitos de fontes de fertilizantes fosfatados na dinâmica do fósforo em solo arenoso / Juliana Bonfim Cassimiro. –

AUTOR(A): JULIANA BONFIM CASSIMIRO
Presidente Prudente, 2024.

ORIENTADOR(A): PROF. DR. CARLOS SÉRGIO TIRITAN
73 f.: il.

Aprovado(a) como parte das exigências para obtenção do título de DOUTOR(A) em AGRONOMIA

Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Universidade do Oeste Paulista - Unoeste, Presidente Prudente, SP, 2024.

Área de Concentração: Vozes do Oeste, pela Comissão Examinadora.
Bibliografia.
Prof. Dr. CARLOS SÉRGIO TIRITAN (Orientador)
Orientador: Carlos Sérgio Tiritan.
UNOESTE - Universidade do Oeste Paulista / Presidente Prudente (SP)

Prof. Dr. MARCELO RAPHAEL VOLP
1. Manejo de fósforo. 2. Arenoso. 3. Labilidade. I. Título.
UNOESTE - Universidade do Oeste Paulista / Presidente Prudente (SP)

Prof. Dr. ALEXANDRE ORIOLETTI MIGNOLA
Catalogação em fontes Mignola
Mologni – CRB 8-6204
UNOESTE - Universidade do Oeste Paulista / Presidente Prudente (SP)

Profa. Dra. CAROLINA DOS SANTOS BATISTA BONINI
UNESP - Universidade Estadual Paulista / UNESP – Dracena (SP)

Prof. Dr. FERNANDO SHINTATE GALINDO
UNESP - Universidade Estadual Paulista / UNESP – Dracena (SP)

Data da realização: Presidente Prudente, 09 de setembro de 2024.



UNIVERSIDADE DO OESTE PAULISTA

Reconhecida pela Portaria ME nº 83/87 D.O.U. 16/02/87
 Recredenciada pela Portaria MEC n.º 284 D.O.U. 14/04/2025

Campus I Pça José Bonifácio, 700 - Cidade Universitária - CEP 19060-020 - Presidente Prudente-SP - Tel: 18 3225-1000 | Campus II Rodovia Raposo Tavares, KM 572 - Bairro Unesteiro - CEP 19967-175 - Presidente Prudente-SP - Tel: 18 3229-2900
 Campus Jd. An. Antonio de Almeida Pacheco, 2945 - 2ª Zona Industrial - CEP 17213-700 - Jd. SP - Tel: 14 3624-1130 | Campus Guarujá Faa Alberto Pedro, 75 - Cond. Guarujá Park - Foz de Iguaçu - CEP 11441-025 - Guarujá-SP - Tel: 13 3386-3032

Central de Assinaturas Eletrônicas

Sobre o documento

Assunto: Documento eletrônico
 Status do documento: Concluído
 Data de criação do documento: 10/09/2024 16:03
 Fuso horário: (UTC-03:00) Brasília
 Número de assinaturas: 5
 Solicitante: KEID RIBEIRO KRUGER (#5893589)

Signatários do documento

ALEXANDRIUS DE MORAES BARBOSA (PROFESSOR)

alexandrius@unoeste.br
 Recebido em 10/09/2024 16:03
 Assinado em 10/09/2024 16:06
 Assinatura Interna UNOESTE
 Usando endereço IP: 177.131.39.1
 ID da assinatura: 3758917

CARLOS SÉRGIO TIRITAN (COORDENADOR DE CURSO)

tiritan@unoeste.br
 Recebido em 10/09/2024 16:03
 Assinado em 11/09/2024 12:48
 Assinatura Interna UNOESTE
 Usando endereço IP: 177.131.33.2
 ID da assinatura: 3758916

MARCELO RAPHAEL VOLF (FUNCIONÁRIO)

marcelovolf@unoeste.br
 Recebido em 10/09/2024 16:03
 Assinado em 11/09/2024 18:47
 Assinatura Interna UNOESTE
 Usando endereço IP: 187.73.201.109
 ID da assinatura: 3758918

FERNANDO SHINTATE GALINDO (SIGNATÁRIO EXTERNO)

fernando.galindo@unesp.br
 Recebido em 10/09/2024 16:03
 Assinado em 10/09/2024 17:54
 Assinatura Interna UNOESTE
 Usando endereço IP: 2804:2b4:10d:130a:bd9:7120:da9f:d150
 ID da assinatura: 3758920

CAROLINA DOS SANTOS BATISTA BONINI (SIGNATÁRIO EXTERNO)

carolina.bonini@unesp.br
 Recebido em 10/09/2024 16:03
 Assinado em 10/09/2024 16:22
 Assinatura Interna UNOESTE
 Usando endereço IP: 2801:88:d9a:140::96b1
 ID da assinatura: 3758919

URL do documento: <https://www.unoeste.br/ca/c9298288>

Assinatura digital do documento: 2019ee95c450b885ba350bad0cf2019947df1c306781c91331287438b344bbd3

UNOESTE - Universidade do Oeste Paulista

Mantida pela EPEC - Empresa Prudentina de Educação e Cultura SA

Utilize o QRCode abaixo para conferir a autenticidade deste documento:



DEDICATÓRIA

Dedico esta tese à memória de minha querida mãe, Maria Izabel Silva Bonfim, que sempre me apoiou incondicionalmente em meus estudos e foi minha maior incentivadora. Sua ausência é sentida profundamente, mas seu exemplo de força e dedicação continuam a me guiar.

Ao meu pai, Jones Ferreira Cassimiro, e à minha tia, Maria Angélica Silva Bonfim, pelo apoio constante em todas as etapas desta jornada.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – (Brasil) CAPES – Código de Financiamento 001”.

À memória de minha mãe, Maria Izabel Silva Bonfim, minha maior incentivadora. Seu apoio incondicional e amor por meu aprendizado foram fundamentais em toda a minha trajetória acadêmica. Mesmo em sua ausência, sinto sua presença e inspiração me guiando em cada conquista.

Ao meu pai, Jones Ferreira Cassimiro, e à minha tia, Maria Angélica Silva Bonfim, por estarem sempre ao meu lado, proporcionando o suporte necessário durante todos os desafios enfrentados. Seu carinho e dedicação foram imprescindíveis.

Ao meu marido, Rafael Baruta, cujas palavras de encorajamento e apoio emocional foram essenciais nos momentos mais difíceis deste percurso.

Aos meus colegas de trabalho, Clayton Luis Baravelli e Juliana Francoso, que estiveram comigo tanto nas análises laboratoriais quanto no trabalho de campo. Agradeço pela parceria e pelo espírito de colaboração que tornaram o trabalho mais leve e produtivo.

Ao meu coorientador, Reges Heinrichs, e ao meu orientador, Carlos Tiritan, por toda a orientação, paciência e confiança depositadas em mim ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Seus ensinamentos foram cruciais para que eu pudesse alcançar este resultado.

Agradeço também aos profissionais do laboratório da UNESP, que, com generosidade e competência, contribuíram de maneira fundamental para a realização desta pesquisa. Sem a colaboração e o apoio técnico de cada um de vocês, este trabalho não teria sido possível.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, fizeram parte dessa jornada, seja com apoio técnico, moral ou emocional. Suas contribuições são inesquecíveis e refletem o sucesso desta empreitada.

“Este Deus faz tudo perfeito e cumpre o que promete. Ele é como um escudo para os que procuram a sua proteção. O SENHOR é o único Deus; somente Deus é a nossa rocha. Ele é o Deus que me dá forças e me protege onde quer que eu vá”.
(Salmos 18:30-35)

RESUMO

Manejo da adubação fosfatada em cana-de-açúcar: efeitos de fontes de fertilizantes fosfatados na dinâmica do fósforo em solo arenoso

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp. L.; Poaceae), com aproximadamente 8,2 milhões de hectares na safra de 2022/2023, gerando uma produção estimada em 625 milhões de toneladas. Esse cultivo desempenha um papel crucial na economia, não apenas na produção de açúcar, mas também na geração de energia renovável e ração animal. Nesse contexto, a gestão eficiente do P no solo torna-se essencial, uma vez que a maioria dos solos brasileiros é naturalmente pobre nesse nutriente. O experimento foi conduzido em uma área comercial de uma usina sucroenergética localizada em Monte Castelo, SP, durante duas safras consecutivas (2020/21 e 2021/22). Foram avaliadas duas fontes de fósforo, fosfato monoamônio convencional (MAP) e fosfato monoamônio revestido com polímero, aplicadas em diferentes doses e formas de manejo. A disponibilidade de fósforo no solo foi determinada pelos métodos de extração Resina Trocadora de Íons e Mehlich-1, em diferentes profundidades do perfil do solo, além da avaliação do estado nutricional das plantas e de atributos produtivos. No Capítulo I, são apresentados os resultados referentes à disponibilidade de fósforo no solo e à resposta nutricional da cultura em função das fontes e doses de fertilizantes fosfatados. Já no Capítulo II, discute-se a labilidade do fósforo no solo cultivado com cana-de-açúcar, por meio do fracionamento das diferentes formas do nutriente no solo. Os resultados evidenciam que a interação entre fontes, doses e métodos de aplicação influencia significativamente a dinâmica do fósforo no solo, com destaque para o potencial dos fertilizantes revestidos em reduzir reações de adsorção e aumentar a eficiência de uso do nutriente. Dessa forma, o manejo adequado da adubação fosfatada constitui estratégia fundamental para otimizar a disponibilidade de fósforo, promover maior eficiência agrônômica e contribuir para sistemas de produção mais sustentáveis na cultura da cana-de-açúcar.

Palavras-chave: fixação de fósforo, resina, mehlich 1, labilidade.

ABSTRACT

Management of phosphorus fertilization in sugarcane: effects of phosphate fertilizer sources on phosphorus dynamics in sandy soil

Brazil is the largest producer of sugarcane (*Saccharum spp.* L.; Poaceae), with approximately 8.2 million hectares cultivated in the 2022/2023 season, generating an estimated production of 625 million tons. This crop plays a crucial role in the economy, not only in sugar production but also in the generation of renewable energy and animal feed. In this context, efficient phosphorus (P) management in the soil becomes essential, since most Brazilian soils are naturally low in this nutrient. The experiment was conducted in a commercial area of a sugar-energy mill located in Monte Castelo, São Paulo State, Brazil, during two consecutive growing seasons (2020/21 and 2021/22). Two phosphorus sources were evaluated: conventional monoammonium phosphate (MAP) and polymer-coated monoammonium phosphate, applied at different rates and management strategies. Soil phosphorus availability was determined using the Ion Exchange Resin and Mehlich-1 extraction methods at different depths of the soil profile, in addition to evaluating the plant nutritional status and productive attributes. Chapter I presents the results related to soil phosphorus availability and the nutritional response of the crop as affected by phosphate fertilizer sources and rates. Chapter II discusses phosphorus lability in soil cultivated with sugarcane through the fractionation of different forms of the nutrient in the soil. The results show that the interaction between fertilizer sources, rates, and application methods significantly influences phosphorus dynamics in the soil, highlighting the potential of coated fertilizers to reduce adsorption reactions and increase nutrient use efficiency. Therefore, proper management of phosphorus fertilization is a key strategy to optimize phosphorus availability, promote greater agronomic efficiency, and contribute to more sustainable production systems in sugarcane cultivation.

Keywords: phosphorus fixation, resin, mehlich-1, lability.

LISTA DE SIGLAS

MAP-P	– Fosfato monoamônico parcelado
Policote-P	– Fosfato monoamônico com polímero aniônico parcelado
P	– Fósforo
M1	– Mhelich 1
P _{RTA}	– Resina de troca aniônica
P _i	– Fósforo inorgânico
P _o	– Fósforo orgânico
P _t	– Fósforo total

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	25
Capítulo I MANEJO DA ADUBAÇÃO FOSFATADA EM CANA-DE-AÇÚCAR: EFEITOS DE FONTES DE FERTILIZANTES FOSFATADOS NA DINÂMICA DO FÓSFORO EM SOLO ARENOSO	27
1 INTRODUÇÃO	17
2 MATERIAL E MÉTODOS	19
2.1 Localização e características da área experimental.....	19
2.2 Delineamento experimental e tratamentos.....	21
2.3. Instalação e condução do experimento.....	22
2.4 Fósforo disponível no solo pelo método resina trocadora de íons e Mehlich.....	23
2.5 Estado nutricional das plantas.....	23
2.6 Análise estatística.....	23
3 RESULTADOS	23
3.1 Fósforo disponível no solo pelo método resina trocadora de íons e Mehlich1.....	24
3.2 Estado nutricional das plantas.....	28
3.3 Produtividade, número de colmos e Qualidade tecnológica da cana-de-açúcar 2021/2022.....	35
4 DISCUSSÃO	37
5 CONCLUSÃO	44
REFERÊNCIAS	45
Capítulo II LABILIDADE DO FÓSFORO EM SOLO CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR ADUBADO COM FOSFATADO REVESTIDO	51
PHOSPHORUS LABILITY IN SOIL CULTIVATED WITH SUGARCANE FERTILISED WITH COATED PHOSPHATE	52
1 INTRODUÇÃO	53
2 MATERIAL E MÉTODOS	54
2.2 Localização e características da área experimental.....	54
2.2 Delineamento experimental e tratamentos.....	56
2.3 Instalação e condução do experimento.....	57
2.4 Fracionamento do Fósforo no solo.....	58
2.5 Análise estatística.....	60
3 RESULTADOS	60
4 DISCUSSÃO	65
4.1 Frações Lábeis de P.....	66
4.2 Frações Moderadamente Lábeis de P.....	67
4.3 Frações Não Lábeis de Fósforo.....	67
4.4 Distribuição Proporcional das Frações de Fósforo.....	68
4.5 Implicações Agronômicas e Ambientais.....	69
5 CONCLUSÃO	70
REFERÊNCIAS	70

INTRODUÇÃO GERAL

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar (*Saccharum spp. L.*; Poaceae), com área cultivada em torno de 9,9 milhões de hectares e produção anual estimada em 715,65 milhões de toneladas, representando um total de cerca de 38% de toda área cultivada no mundo e 38,5% de toda produção (FAOSTAT, 2023). A cultura apresenta elevada expansão na produção, devido ao avanço e busca por produção de energia renovável, tanto pelo etanol quanto cogeração de energia. Além disso, a cultura também pode ser utilizada na extração do açúcar e alimentação animal (Heinrichs *et al.*, 2017).

A demanda por alimentos e preocupações com a segurança alimentar mundial são consequências de uma expectativa de crescimento populacional ao longo dos próximos anos, trazendo consigo a necessidade de alcances cada vez maiores de produtividades agrícolas, que por sua vez serão sustentadas, dentre os diversos insumos, por fertilizantes minerais (Helin; Weikard, 2019). A Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO), estimou um crescimento médio de 1,9% ao ano na demanda mundial por fertilizantes, que alcançou no ano de 2020 cerca de 201 milhões de toneladas, destes, 46 milhões de toneladas corresponderam aos fertilizantes fosfatados (FAOSTAT, 2023).

O fósforo é um macronutriente indispensável para processos cruciais, como a fotossíntese, metabolismo energético e divisão celular (Ballotin *et al.*, 2022; Barra *et al.*, 2019). No contexto agrícola, o fósforo é geralmente aplicado na forma de fertilizantes solúveis, devido à baixa mobilidade do elemento no solo, o que requer doses elevadas para alcançar a produtividade desejada (Sousa *et al.*, 2016). O fósforo também desempenha papel vital no crescimento da cana-de-açúcar, influenciando o perfilhamento, o desenvolvimento de colmos e o vigor das plantas (Santos *et al.*, 2009). A baixa disponibilidade de P no solo compromete esses processos, afetando negativamente o desenvolvimento da cultura.

A baixa disponibilidade de fósforo (P) nos solos brasileiros é um dos maiores desafios para a produção agrícola no país, sendo este nutriente essencial para o desenvolvimento das plantas. Fatores como as propriedades do solo, modo e tempo de aplicação dos fertilizantes, umidade e tipo de planta, além de condições climáticas como temperatura e precipitação, são determinantes na disponibilidade de fósforo (Freire *et al.*, 2022; Novais; Smyth, 1999). O alto teor de minerais

sesquióxidos em solos intemperizados favorece a fixação de P, resultando em baixas concentrações disponíveis para as plantas, mesmo com a aplicação de adubações fosfatadas em grandes quantidades (Johan *et al.*, 2021). Além disso, a interação de ânions e cátions no solo afeta a mobilidade e disponibilidade dos nutrientes, incluindo o P, impactando diretamente a nutrição das plantas (Andrade *et al.*, 2003; Moreira; Dourado, 2007).

Os ácidos orgânicos presentes no solo podem formar complexos com ferro e alumínio, competindo com o fósforo pelos sítios de adsorção, o que aumenta sua disponibilidade para as plantas (Pavinato; Rosolem, 2008). A eficácia dessa competição depende de fatores como pH, concentração de ácidos orgânicos e força iônica do solo (Kirk, 1999; Rauen *et al.*, 2002).

Diante dessa realidade, a indústria de fertilizantes tem desenvolvido novas tecnologias para aumentar a eficiência agrônômica dos fertilizantes, incluindo os fertilizantes de liberação lenta ou controlada, como os revestidos com polímeros ou enxofre, que podem reduzir as perdas de P por adsorção nos solos (Almeida, 2016; Figueiredo *et al.*, 2012). Fertilizantes convencionais estão mais suscetíveis às condições ambientais, liberando nutrientes de forma descontrolada, enquanto os fertilizantes revestidos podem prolongar o tempo de liberação, aumentando sua eficiência (Zavaschi *et al.*, 2020). Estudos com fertilizantes revestidos com Policote, por exemplo, indicam aumento na eficiência agrônômica e na produtividade de culturas como a cenoura, com uma elevação média de 15,5% na produtividade em relação aos fertilizantes convencionais (Pelá *et al.*, 2018).

Este estudo teve como objetivo investigar os impactos da adubação fosfatada no cultivo de cana-de-açúcar, avaliando o efeito de fontes de fósforo revestidas com polímeros e sem revestimento. Buscando entender a influência dessas diferentes fontes, doses e métodos de aplicação, tanto no sulco de plantio quanto de forma parcelada, na disponibilidade do nutriente no solo e na planta ao longo do desenvolvimento da cultura. O intuito foi aprimorar o conhecimento sobre práticas de adubação fosfatada, contribuindo para otimizar a produção de cana-de-açúcar de forma eficiente.

Capítulo I

MANEJO DA ADUBAÇÃO FOSFATADA EM CANA-DE-AÇUCAR: EFEITOS DE FONTES DE FERTILIZANTES FOSFATADOS NA DINÂMICA DO FOSFÓRO EM SOLO ARENOSO

RESUMO

O Brasil detém extensas áreas dedicadas ao cultivo de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp. L.; Poaceae), abrangendo aproximadamente 8,2 milhões de hectares na safra de 2022/2023, com uma produção estimada em 625 milhões de toneladas. Nesse contexto, a gestão eficaz do fósforo (P) no solo assume uma importância crítica, especialmente devido à expansão dessa cultura e sua relevância para a produção de energia renovável, açúcar e ração animal. A maioria dos solos brasileiros é naturalmente deficiente em fósforo, reforçando a necessidade de uma fertilização adequada. Buscou-se compreender como a utilização de diferentes fontes de fósforo (P), revestidas e não revestidas com polímeros, influencia a absorção de nutrientes e o crescimento da cultura. Os objetivos específicos foram: avaliar o efeito de fontes de fósforo revestidas com polímeros e sem revestimento; verificar o efeito residual das diferentes fontes de fósforo; e a eficácia das fontes. O estudo foi realizado em uma área comercial de uma usina sucroenergética em Monte Castelo, SP. Avaliou-se o impacto de diferentes fontes de P, fosfato monoamônio com polímero e Fosfato monoamônio (MAP), aplicadas em doses de 180 e 240 kg de P_2O_5 por hectare, no sulco de plantio e de forma parcelada. Utilizaram-se métodos de extração de fósforo, como resina e mehlich 1, em diferentes profundidades do solo (0,0-0,1; 0,1-0,2; 0,2-0,4 m). Os resultados evidenciaram uma influência significativa da interação entre a fonte de P e a dose aplicada, assim como a presença de polímeros, nos teores de P extraídos. Notou-se que a profundidade do solo influencia de maneira distinta a disponibilidade de P, com variações nas concentrações dependendo do método de extração e da presença de polímeros. Este estudo sublinha a importância de selecionar corretamente a fonte de fósforo e o método de extração para otimizar a disponibilidade deste nutriente no solo, considerando a acidez e as características específicas do terreno. A pesquisa enfatiza a necessidade de gestão eficiente do P no solo para aumentar a produtividade da cana-de-açúcar e ressalta a complexidade das interações entre a fonte de P, a presença de polímeros e os métodos de extração, fatores essenciais para formular estratégias sustentáveis de adubação.

Palavras-chave: mehlich1, resina, polímeros, *Saccharum* spp.

MANAGEMENT OF PHOSPHORUS FERTILIZATION IN SUGARCANE: EFFECTS OF PHOSPHATE FERTILIZER SOURCES ON PHOSPHORUS DYNAMICS IN SANDY SOIL

ABSTRACT

Brazil has extensive areas dedicated to the cultivation of sugarcane (*Saccharum spp.* L.; Poaceae), covering approximately 8.2 million hectares in the 2022/2023 growing season, with an estimated production of 625 million tons. In this context, effective phosphorus (P) management in the soil becomes critically important, especially due to the expansion of this crop and its relevance for the production of renewable energy, sugar, and animal feed. Most Brazilian soils are naturally deficient in phosphorus, reinforcing the need for adequate fertilization. This study aimed to understand how the use of different phosphorus (P) sources, coated and uncoated with polymers, influences nutrient uptake and crop growth. The specific objectives were: to evaluate the effect of polymer-coated and uncoated phosphorus sources; to verify the residual effect of the different phosphorus sources; and to assess the efficiency of these sources. The study was conducted in a commercial area of a sugar-energy mill located in Monte Castelo, São Paulo State, Brazil. The impact of different P sources, polymer-coated monoammonium phosphate and monoammonium phosphate (MAP), was evaluated at application rates of 180 and 240 kg of P₂O₅ per hectare, applied in the planting furrow and in split applications. Phosphorus extraction methods, such as ion exchange resin and Mehlich-1, were used at different soil depths (0.0–0.1; 0.1–0.2; 0.2–0.4 m). The results showed a significant influence of the interaction between the P source and the applied rate, as well as the presence of polymers, on the levels of extracted P. Soil depth also influenced P availability in different ways, with variations in concentrations depending on the extraction method and the presence of polymers. This study highlights the importance of correctly selecting the phosphorus source and the extraction method to optimize the availability of this nutrient in the soil, considering soil acidity and the specific characteristics of the field. The research emphasizes the need for efficient P management in the soil to increase sugarcane productivity and underscores the complexity of interactions among P source, polymer presence, and extraction methods, key factors for developing sustainable fertilization strategies.

Keywords: mehlich1, resin, polymers, *Saccharum spp.*

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar (*Saccharum spp. L.*; Poaceae), com área cultivada em torno de 9,9 milhões de hectares e produção anual estimada em 715,65 milhões de toneladas, representando um total de cerca de 38% de toda área cultivada no mundo e 38,5% de toda produção (FAOSTAT, 2023). A cultura apresenta elevada expansão na produção, devido ao avanço e busca por produção de energia renovável, tanto pelo etanol quanto cogeração de energia. Além disso, a cultura também pode ser utilizada na extração do açúcar e alimentação animal (Heinrichs *et al.*, 2017).

A demanda por alimentos e preocupações com a segurança alimentar mundial são consequências de uma expectativa de crescimento populacional ao longo dos próximos anos, trazendo consigo a necessidade de alcançarmos cada vez maiores produtividades agrícolas, que por sua vez serão sustentadas, dentre os diversos insumos, por fertilizantes minerais (Helin; Weikard 2019). A Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO), estimou um crescimento médio de 1,9% ao ano na demanda mundial por fertilizantes, que alcançou no ano de 2020 cerca de 201 milhões de toneladas, destes, 46 milhões de toneladas corresponderam aos fertilizantes fosfatados (FAO, 2020).

O fósforo (P) é um elemento indispensável para toda a vida na Terra, presente em todas as células vivas, na forma biomoléculas como proteínas quinases, ácidos nucleicos, adenina trifosfato (ATP) e lipídios das membranas celulares, além de ser um dos macronutrientes que apresenta uma influência crucial para alcançar altos rendimentos das culturas e sobre as propriedades dos ecossistemas (Ballotin *et al.*, 2022; Barra *et al.*, 2019).

No entanto a deficiência de fósforo (P) é um problema mundial, especialmente em regiões de clima tropical com solos altamente intemperizados (Teles *et al.*, 2017). Sendo assim, originalmente a grande maioria dos solos brasileiros apresenta baixa disponibilidade de fósforo. A forma de manejo do solo é essencial para a disponibilidade dos nutrientes, sendo capaz de beneficiar a eficiência agronômica dos adubos fosfatados (Freire *et al.*, 2022).

A cana-de-açúcar pode exportar aproximadamente 30 kg de P_2O_5 para produzir 100 Mg ha^{-1} de colmos (Vitti *et al.*, 2015). A alta adsorção de P em óxidos/hidróxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al), que normalmente adsorvem a maior

parte do P aplicado no solo (Zavaschi *et al.*, 2020), explica a alta taxa de P aplicada nos canaviais em Brasil. Withers *et al.* (2018) mostraram que em solo tropical ácido, uma taxa de 35 kg P ha⁻¹ (ou 80 kg ha⁻¹ P₂O₅) é necessária para superar a imobilização (adsorção) de P no solo. Os fertilizantes fosfatados, comumente utilizados, são solúveis e requerem grandes quantidades de rocha fosfática e ácidos para sua produção.

Conhecer o nível de P disponível no solo é extremamente importante para gerir o fornecimento de P da fase sólida para a solução do solo e em seguida a sua absorção pelas plantas. Assim, o uso de métodos adequados de extração permite fazer recomendações de adubações para diferentes tipos de solo resultando em benefícios econômicos e ambientais (Koralage *et al.*, 2015). A investigação de estratégias voltadas para a utilização mais eficaz do fósforo na agricultura assume um papel crucial na promoção da sustentabilidade da atividade agrícola e na garantia da segurança alimentar da população (Zucareli *et al.*, 2018).

O desafio atual reside na concepção de estratégias mais eficazes para otimizar o uso do fósforo, visando à produção sustentável e à preservação dos solos, prevenindo a exaustão natural, a degradação ambiental e potenciais riscos para o bem-estar humano. O manejo apropriado da adubação fosfatada começa com a precisa avaliação do teor de fósforo disponível no solo. Ter um conhecimento sólido do nível de fósforo disponível é de extrema importância para administrar o suprimento de fósforo da fase sólida para a solução do solo e, conseqüentemente, para a sua absorção pelas plantas. Portanto, a utilização de métodos de extração adequados possibilita a formulação de recomendações de adubação adaptadas a diferentes tipos de solo, resultando em ganhos tanto econômicos quanto ambientais (Carneiro *et al.*, 2023; Koralage *et al.*, 2015).

Nas adubações, o P é geralmente fornecido às plantas na forma de fertilizantes fosfatados solúveis como é o caso do fosfato monoamônio, sendo necessárias altas doses para se obterem produções comerciais (Sousa *et al.*, 2016), devido a absorção de fósforo pelas raízes das plantas que é feita predominantemente por processo dependente da difusão do P no solo, que ocorre numa taxa muito lenta para atender às necessidades das plantas. Algumas estratégias encontradas pelas indústrias foi o desenvolvimento de novas tecnologias, como os fertilizantes que são caracterizados por grânulos revestidos

com substâncias inorgânicas (polímeros sintéticos) (Almeida, 2016), gerando menor fixação de fósforo no solo, aumentando sua disponibilidade para as plantas.

A aplicação de revestimento em fertilizantes fosfatados com polímeros aniônicos, que possuem afinidade por cátions como alumínio e ferro, pode mitigar os impactos adversos da precipitação de fósforo no solo, resultando em uma maior eficiência na utilização de fertilizantes fosfatados (Chagas *et al.*, 2016b; Guelfi *et al.*, 2018). Fontes alternativas de P com maior eficiência de uso são necessárias para construir uma economia circular, especialmente considerando as evidências recentes de uso excessivo de P em áreas tropicais e alta demanda de P para produção agrícola (Lopes *et al.*, 2021).

Este estudo teve como objetivo principal investigar de forma abrangente os impactos da adubação fosfatada no cultivo de cana-de-açúcar, avaliando o efeito de fontes de fósforo revestidas com polímeros e sem revestimento. Buscando entender a influência dessas diferentes fontes, doses e métodos de aplicação, tanto no sulco de plantio quanto de forma parcelada, na disponibilidade do nutriente no solo e na planta ao longo do desenvolvimento da cultura. O intuito foi aprimorar o conhecimento sobre práticas de adubação fosfatada, contribuindo para otimizar a produção de cana-de-açúcar de forma eficiente.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Localização e características da área experimental

O experimento foi realizado durante duas safras (2020/21 e 2021/22) em área comercial, na unidade produtora da usina sucroenergética Ipê localizada no município de Monte Castelo na região Oeste do Estado de São Paulo, latitude 21° 12'57.26" S, longitude 51° 35'4,45" W e altitude 309m. A variedade utilizada foi a CTC 9001. O solo é classificado como Argissolo Vermelho Amarelo Distrófico, com textura arenosa (Santos *et al.*, 2018), correspondendo a um Ultisol (Soil Survey Division, 2014) (Table 1). O clima local, conforme a classificação de Koppen é do tipo Aw, caracterizado pelas estações de clima quente de inverno seco (Alvares *et al.*, 2013). As médias anuais de temperatura e precipitação são, respectivamente, 24°C e 1.300 mm, com temperatura média máxima de 31°C e média mínima de 19°C.

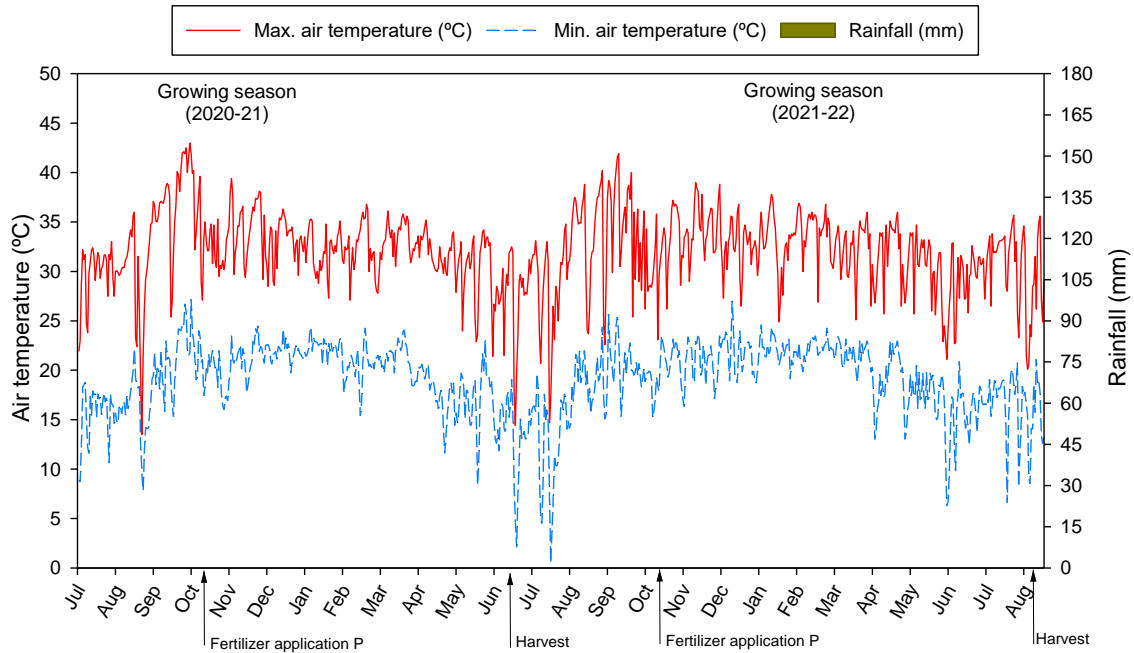


Figura 1. Precipitação e temperatura mínima e máxima observada durante o período experimental. Fonte: Estação climatológica – UNESP 2020/21 e 2021/22.

Tabela 1. Atributos químicos e granulometria do solo da área experimental na profundidade de 0,0-0,1m; 0,1-0,2m, 0,2-0,4m, Monte Castelo, SP, 2018.

Prof.	pH	MO	P	K	Ca	Mg	H+Al	Al	SB	CTC	
m		g dm ⁻³	mg dm ⁻³	----- mmol _c dm ⁻³ -----							
0,0-0,1	6	15	20	0.7	25	11	11	0	36.7	47.7	
0,1-0,2	5.2	10	7	0.7	16	6	12	0	22.7	34.7	
0,2-0,4	4.4	9	14	0.5	5	4	15	2	9.5	24.5	
Prof.	V	m	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn			
m	-----%-----		-----mg dm ⁻³ -----								
0.0-0.1	77	0	12	0.08	0.7	10.1	24	1.6			
0.1-0.2	65	0	9	0.05	0.8	9.2	27.3	0.4			
0.2-0.4	39	17	14	0.05	1.1	9.8	26.4	0.2			

Prof.	Argila	Silte	Areia Total	Areia Grossa	Areia Fina
m	----- g kg ⁻¹ -----				
0,0-0,1	113	24	863	334	529
0,1-0,2	113	26	861	318	543
0,2-0,4	138	31	831	262	569

P, Ca, Mg e K: resina trocadora de íons; S: fosfato de cálcio; B: água quente; SB: soma de bases (K+Ca+Mg); Cu, Fe, Mn e Zn: DTPA em pH 7,3; CTC: capacidade de troca de cátions.

2.2 Delineamento experimental e tratamentos

O experimento foi realizado nos anos agrícolas de 2020/21 e 2021/22 em blocos ao acaso com quatro repetições, totalizando 9 tratamentos, composto de duas fontes fosfatadas fosfato monoamônio revestida com polímero (MAP+P, 10% N, 49% P₂O₅) e Fosfato monoamônio convencional (MAP, 11% N, 52% P₂O₅), e duas doses 180 e 240 kg P₂O₅ ha⁻¹ no sulco de plantio e parcelado (o parcelamento foi aplicado em superfície, sobre a linha de cultura), acrescido um tratamento sem adubação (sem P), o produto composto por polímeros aniônicos são solúveis com 93,7% de biodegradabilidade.

A função é diminuir a atividade de Fe²⁺ e Al³⁺ próximo aos grânulos de MAP e diminuir as reações de precipitação de P com estes cátions. Outra finalidade é melhorar as características físicas e físico-químicas dos fertilizantes, aumentando a dureza e reduzindo a acidez livre, a higroscopicidade e a tendência do fertilizante em formar poeira (Junior; Silva 2012). A adubação de plantio para N e K foram de acordo com a recomendação oficial do estado de São Paulo, dentro das respectivas faixas de interpretação Raij *et al.* (1997). Após 143 (06/09/2019) dias após o plantio (quebra lombo) foi realizado a adubação de cobertura com 120 kg ha⁻¹ de K₂O via cloreto de potássio (60% de K₂O) em função da análise do solo e a complementação da adubação nitrogenada com ureia, com 90 kg ha⁻¹ de N via sulfato de amônio (24% de S; 21% de N) e ureia (45% de N) em função da expectativa de produção.

Tabela 2. Descrição dos tratamentos utilizados na cultura da cana-de-açúcar, no período de três anos

Tratamentos	Fonte	Cana-planta	1ª Soca	2ª Soca	Total
	P	(1º corte)	(2º corte)	(3º corte)	(kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)
----- kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹ -----					
1	Controle	-	-	-	-
2	MAP	180	-	-	180
3	MAP	240	-	-	240
4	MAP-P	120	60	-	180
5	MAP-P	120	60	60	240
6	Policote	180	-	-	180
7	Policote	240	-	-	240
8	Policote-P	120	60	-	180
9	Policote-P	120	60	60	240

Policote - Fosfato monoamônio com polímero: 10%N 49%P₂O₅; MAP - Fosfato monoamônio sem polímero: 11%N 52%P₂O₅; Policote-P e MAP-P – Fontes parceladas

2.3 Instalação e condução do experimento

A área foi preparada para o plantio de cana-de-açúcar em janeiro de 2019, foi realizado a aplicação de 1,5 t ha⁻¹ de calcário dolomítico (PRNT 90%), seguido com aplicação de 1 t ha⁻¹ de gesso agrícola, fosfatagem de 0,6 t ha⁻¹ de fosfato natural (27% P₂O₅) e em seguida foi realizada a subsolagem com equipamento provido de 7 hastes manejado na profundidade de 0,45 m. Os fertilizantes fosfatados foram aplicados no sulco de plantio, antes da acomodação dos colmos sementes. As parcelas experimentais foram de 144 m², formada por 6 linhas de cana-de-açúcar, com espaçamento de 1,5 m nas entre linhas e 20 m de comprimento, colheita foi realizada de forma mecanizada e pesagem da produção de colmos com transbordo provido de célula de carga.

2.4 Fósforo disponível no solo pelo método resina trocadora de íons e Mehlich

Antes de cada colheita (02/05/2021 e 24/06/2022), retirou-se seis amostras de 0,00-0,10m e 0,00-0,20m por tratamento, homogeneizadas, secas ao ar e passadas em peneira de malha 2mm. A disponibilidade de P no solo foi avaliada pelos métodos Resina Trocadora de Íons (P-Resin) e Mehlich 1 (M1). Para análise do P-Resin foi utilizada a metodologia descrita por Raij *et al.* (2001), na qual se utiliza resina catiônica tratada com NaHCO_3 1 mol L^{-1} e pH 8,5. O extrator M1 foi preparado com a mistura de dois ácidos diluídos (0,05 mol L^{-1} de HCl e 0,0125 mol L^{-1} de H_2SO_4) seguindo o que descreve Tedesco *et al.* (2004). A concentração de P na solução dos dois extratores foram método da quantificação do complexo fosfomolibdato em um espectrofotômetro visível por UV, com leitura em comprimento de onda de 660 nm, seguindo metodologia descrita por (Murphy; Riley, 1962).

2.5 Estado nutricional das plantas

Foram avaliados em cada ciclo de crescimento (1ª e 2ª cana soca) os teores de macronutrientes na folha +1, utilizando-se os 20 cm centrais sem a nervura central, colhidas na fase de maior desenvolvimento vegetativo, seguindo a metodologia descrita por Malavolta (1997).

2.6 Análise estatística

As análises foram realizadas em duas etapas, em ambas, os dados foram testados quanto à normalidade dos erros e homogeneidade de variância e as análises estatísticas foram realizadas por meio do programa (SAS® 2022). Os resultados foram submetidos à ANOVA, constatado significância, as médias dos tratamentos de P foram comparadas entre si pelo teste Tukey ($p < 0,05$) (Pimentel-Gomes, 2009). Os gráficos foram traçados utilizando Sigmaplot® 15.

3. RESULTADOS

3.1 Fósforo disponível no solo pelo método resina trocadora de íons e Mehlich1

No primeiro ano de avaliação (primeira soca), pelo método de extração de P-Resina na camada de 0,00-0,10m os tratamentos Policote-P_{180kg} e Policote-P_{240kg} (30,9 e 30,1 mg dm⁻³) obtiveram as maiores concentrações, não diferenciando entre si e também dos tratamentos MAP_{180kg}, Policote_{180kg} e Policote_{240kg}, que não diferenciaram dos tratamentos MAP_{240kg}, MAP-P_{180kg} e MAP-P_{240kg}, sendo o tratamento controle (mg dm⁻³) obtendo o menor teor (fig. 2a). Na camada de 0,10-0,20m os tratamentos MAP-P_{240kg}, Policote_{240kg}, Policote-P_{180kg} e Policote-P_{240kg} (7,2, 8,9 10,6, 10,7 e 8,5 mg dm⁻³ respectivamente) apresentaram as maiores concentração e o tratamento controle o menor, não diferenciando dos tratamentos MAP_{180kg} e MAP-P_{180kg} (fig .2 c). Na camada de 0,20-0,40m os tratamentos MAP_{180kg} e Policote-P_{240kg} obtiveram os maiores teores, 6,7 e 5,7 mg dm⁻³ respectivamente, enquanto os tratamentos Controle, MAP_{240kg}, MAP-P_{240kg} e Policote_{240kg} (2,34, 2,49 e 2,24 mg dm⁻³ respectivamente) apresentaram as menores (fig. 2e).

Pelo extrator M1 na camada de 0,00-0,10m, o tratamento MAP_{180kg} apresentou maior concentração (82,5 mg dm⁻³), não diferenciando dos tratamentos MAP-P_{180kg}, MAP-P_{240kg}, Policote_{180kg}, Policote-P_{180kg} e Policote-P_{240kg}, que por sua vez, não diferenciam dos tratamentos MAP_{240kg} e Policote_{240kg}, e sendo tratamento Controle (32,1 mg dm⁻³) o com menor teor de P (fig. 2b). Na camada de 0,10-0,20m os tratamentos Policote-P_{180kg} apresentou a maior concentração (48,1 mg dm⁻³), não diferenciando dos tratamentos MAP_{240kg} e Policote-P_{240kg}. Os tratamentos Controle, MAP_{180kg} e MAP-P_{180kg} e (20,9, 21,8 e 23 mg dm⁻³ respectivamente) apresentaram os menores teores, entretanto, não diferenciaram do MAP-P_{240kg}, Policote_{180kg}, Policote_{240kg} e Policote-P_{180kg} (fig. 2d). Na camada subsuperficial (0,20-0,40m), os tratamentos MAP-P_{240kg} e Policote-P_{240kg} (5,3 e 5,1 mg dm⁻³) apresentaram as maiores concentrações, enquanto os tratamentos Controle, MAP_{180kg} e Policote_{240kg} (0,5, 0,2 e 0,3 mg dm⁻³ respectivamente) apresentaram as menores (fig. 2f).

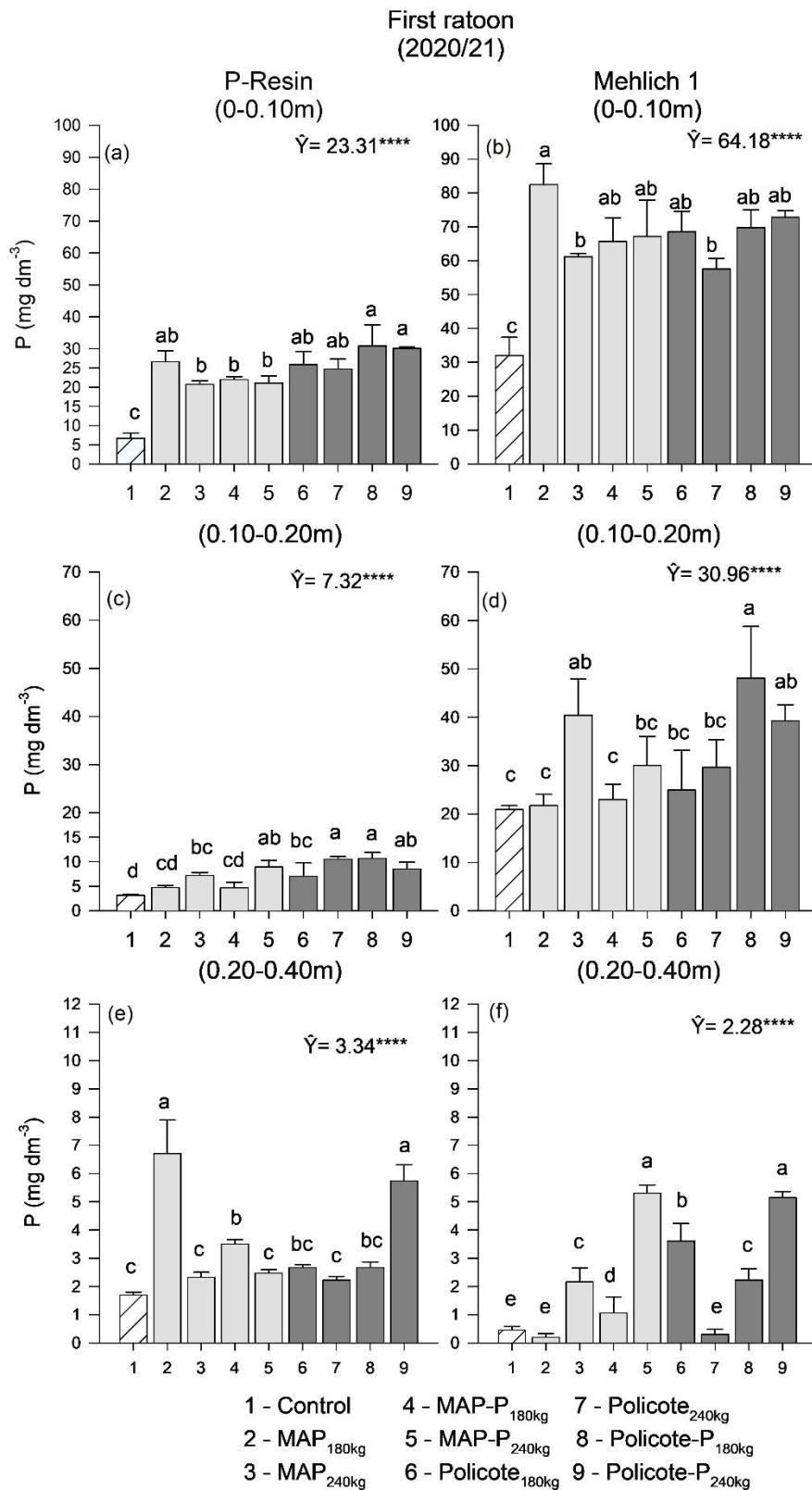


Figura 2. Teor de fósforo extraído pelos métodos resina de troca aniônica (a,c,e) e Mehlich 1 (b,d,f) na camada de 00,0-0,10 m; 0,10-0,20 m e 0,20-0,40 de profundidade, em resposta à doses e fontes de fósforo. Letras diferentes minúsculas indicam diferenças estatísticas entre os tratamentos usando o teste Tukey ($p < 0,05$). As barras colunas representam o erro padrão da média

No segundo ano de avaliação (segunda soca), pelo extrator P-resin, o tratamento MAP-P_{240kg} (34,65 mg dm⁻³) obteve maior concentração, não diferenciando dos tratamentos Policote-P_{180kg} e Policote-P_{240kg}, no qual, o tratamento Controle (6,76 mg dm⁻³) obtendo o menor teor de P na camada de 0,00-0,10m (fig 3a). Na camada de 0,10-0,20m os tratamentos MAP_{180kg} e Policote-P_{240kg} (12,6 e 11,5 mg dm⁻³) apresentaram as maiores concentrações e diferindo estatisticamente dos demais tratamentos, o tratamento controle (2,4 mg dm⁻³) apresentou menor teor para profundidade (fig. 3c). A camada de 0,20-0,40m o tratamento MAP_{180kg} (11,1 mg dm⁻³) diferenciou dos demais tratamentos seguidos do tratamento Policote-P_{240kg} (8,4 mg dm⁻³), os tratamentos Controle, MAP-P_{240kg} e Policote_{180kg} não diferiram entre si e apresentando os menores teores (fig.3 e).

Pelo extrator M1 na camada superficial (0,00-0,10m) o tratamento com maior concentração foi o Policote-P_{180kg} (88,2 mg dm⁻³) não diferenciando dos tratamentos MAP_{240kg}, MAP-P_{180kg} e MAP-P_{240kg} (83,8, 70,7 e 74,3 mg dm⁻³), sendo o tratamento controle (23,5 mg dm⁻³) diferenciando dos demais e apresentando o menor teor de P (fig. 3 b). Na camada de 0,10-0,20m o tratamento MAP-P_{240kg} (52 mg dm⁻³) apresentou maior teor, não diferindo, dos tratamentos MAP_{180kg} e Policote-P_{240kg} (38,4 e 39,9 mg dm⁻³), as menores concentrações foram apresentadas pelos tratamentos Controle e MAP-P_{180kg} (5,5 e 11,1 mg dm⁻³) (fig. 3 d). Na camada subsuperficial (0,20-0,40m) os tratamentos MAP_{180kg}, MAP_{240kg} e Policote-P_{240kg} (20,2, 20,3 e 20,8 mg dm⁻³) apresentaram as maiores concentrações, enquanto os tratamentos Controle, MAP-P_{180kg} e Policote_{180kg} (1,5, 5,0 e 4,8 mg dm⁻³ respectivamente) os menores (fig. 3 e).

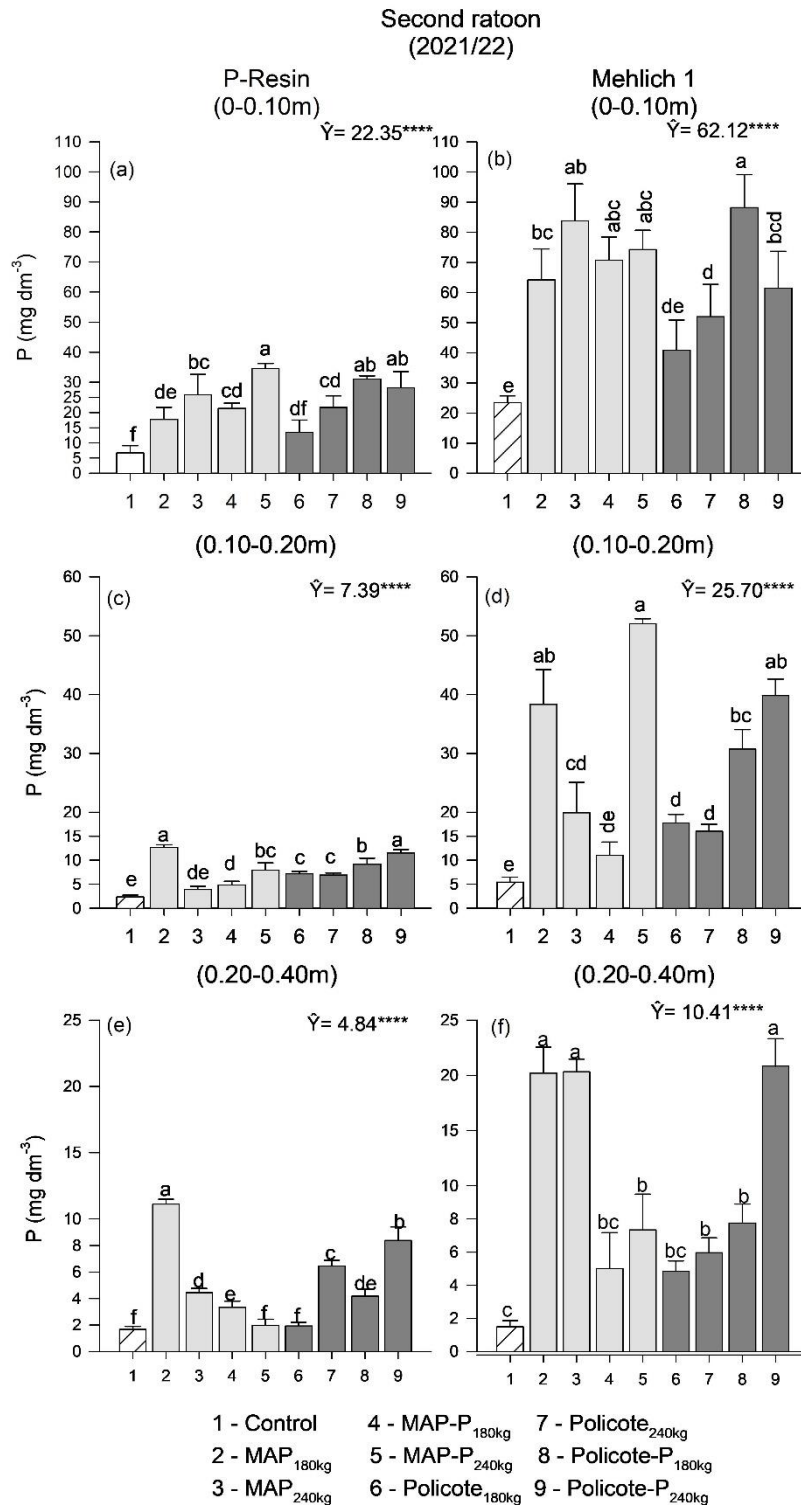


Figura 3. Teor de fósforo extraído pelos métodos resina de troca aniônica (a,c,e) e Mehlich 1 (b,d,f) na camada de 00,0-0,10 m; 0,10-0,20 m e 0,20-0,40 de profundidade, em resposta à doses e fontes de fósforo. Letras diferentes minúsculas indicam diferenças estatísticas entre os tratamentos usando o teste Tukey ($p < 0,05$). As barras escuras nas colunas representam o erro padrão da média

3.2 Estado nutricional das plantas

De modo geral, os teores foliares responderam aos tratamentos, entre os macronutrientes primários, somente N (primeira soca) e K (segunda soca) não responderam aos fertilizantes, apresentando média de 16.4 e 14 g kg⁻¹ respectivamente (fig. 4a, e). Nos teores de N (segunda soca), o tratamento controle (12,5g kg⁻¹) apresentou a menor concentração foliar, diferindo dos demais (Fig. 4b). Para os teores de P, os tratamentos Controle e MAP_{180kg} (1,4 e 1,4g kg⁻¹) apresentaram os menores teores e diferentes dos demais, e no segundo ano de avaliação, o Controle (2,5 g kg⁻¹) obteve a menor concentração, entretanto, só diferenciando do tratamento Policote_{240kg} (3 g kg⁻¹) (fig. 4c, d). Para os teores de K, o tratamento MAP_{240kg} (13,4 g kg⁻¹) apresentou o maior teor, não diferindo do tratamento Policote_{180kg} (12,8 g kg⁻¹), e os tratamentos MAP-P_{180kg} e MAP-P_{240kg} (11,1 e 11,5g kg⁻¹) obtiveram os menores teores, seguidos do tratamento Policote_{240kg} (fig. 4e).

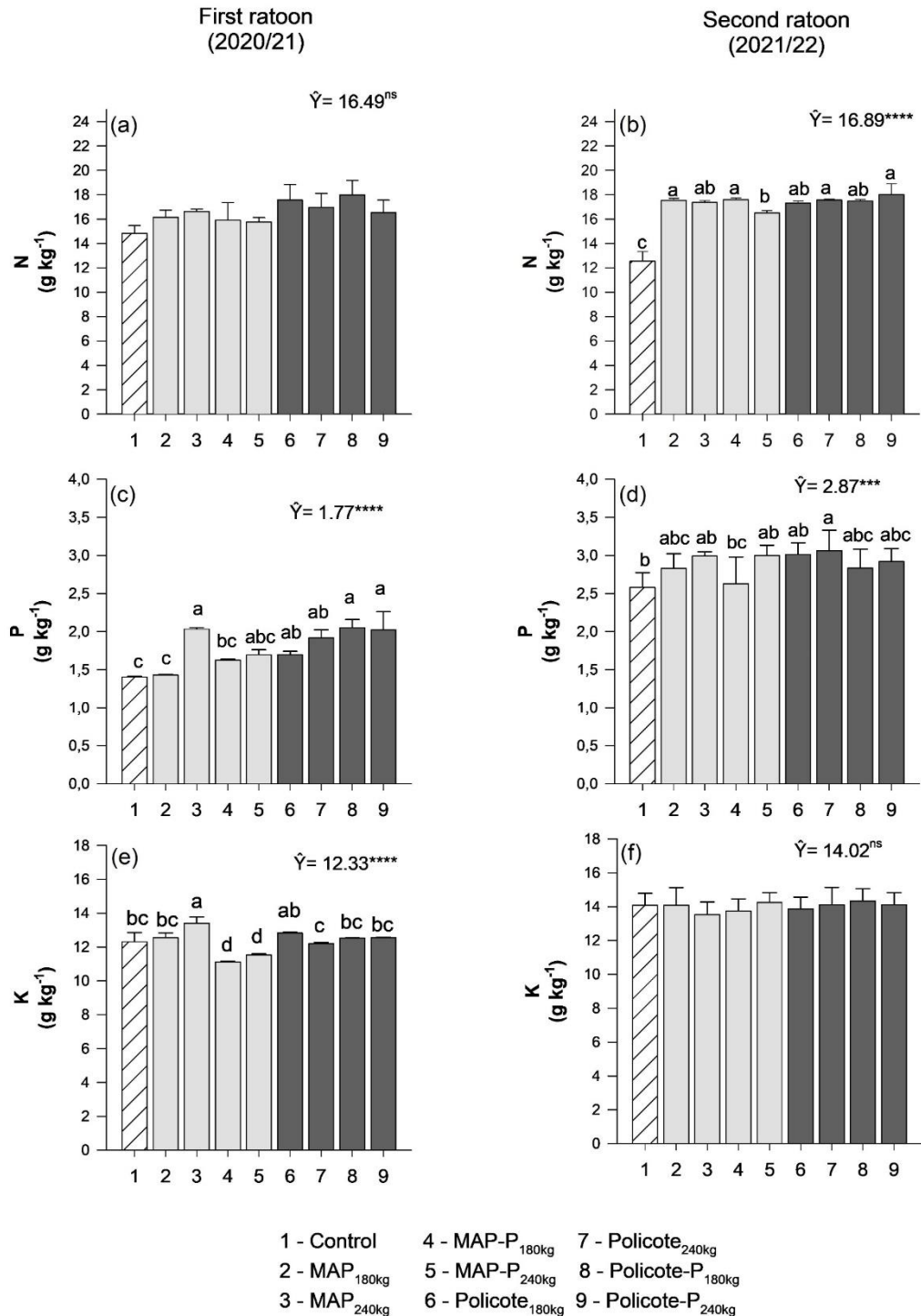


Figura 4. Teores de N-P-K foliar em resposta à fertilização com diferentes fontes e doses de fósforo, Épocas de cultivo 2020/2021 e 2021/2022

Os teores para os macronutrientes secundários, responderam aos tratamentos, sendo Mg (segunda soca) o único a não apresentar diferença significativa, com média de $1,06 \text{ g kg}^{-1}$ (fig. 5d). Nos teores de Ca o tratamento Policote-P_{180kg} ($8,6 \text{ g kg}^{-1}$) na primeira soca apresentou maior teor foliar, não diferindo

dos tratamentos MAP-P_{240kg} e Policote-P_{240kg} (7,9 e 8g kg⁻¹)(fig. 5a). Na segunda soca o tratamento Policote-P_{240kg} (6,5g kg⁻¹) diferiu dos demais tratamentos (fig. 4b). Os teores de Mg na primeira socam, os tratamentos Controle, MAP_{180kg} e MAP-P_{180kg} (2,4, 2,3 e 2,4g kg⁻¹ respectivamente) a presentaram as menores concentrações, não diferindo do tratamento Policote_{240kg} (2,6 g kg⁻¹) (fig. 5c). Na primeira soca os teores de S foliar, o tratamento Policote-P_{180kg} apresentou maior concentração, não diferindo, dos tratamentos MAP_{180kg}, MAP-P_{180kg}, Policote_{180kg} (ambos com 1,2g kg⁻¹) (fig. 5e). Na segunda soca, o tratamento MAP-P_{240kg} (2,6g kg⁻¹) obteve o maior teor foliar e diferenciou dos demais tratamentos (fig. 5f).

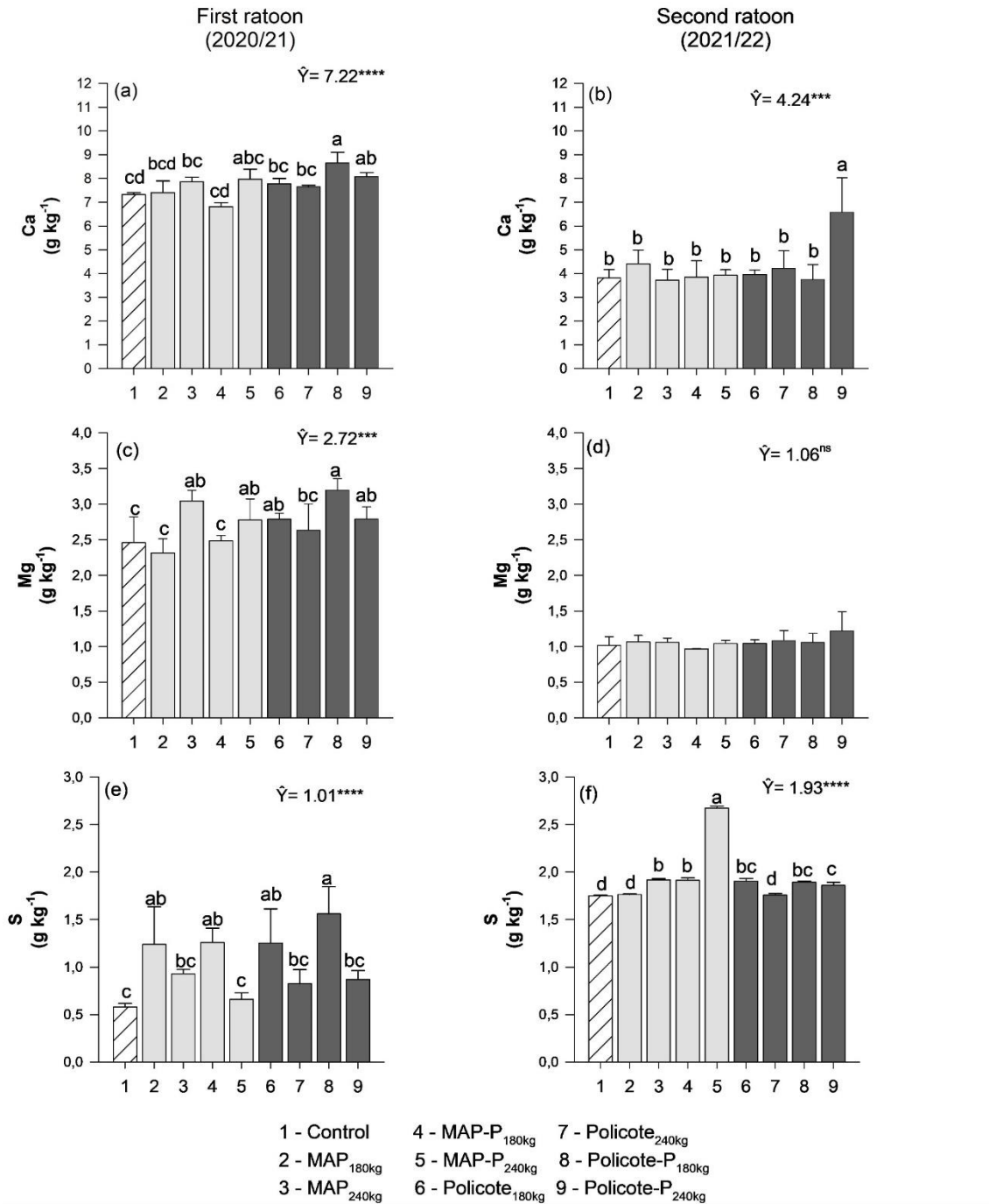


Figura 5. Teores de Ca e Mg e S foliar em resposta à fertilização com diferentes fontes e doses de fósforo, épocas de cultivo 2020/2021 e 2021/2022.

Os teores foliares de B, responderam as fontes aplicadas (fig. 6), na primeira soca, os tratamentos MAP_{180kg} e MAP-P_{180kg} (24,1 e 23,9mg kg⁻¹) apresentaram maiores teores, seguido do tratamento MAP_{240kg} (fig. 6a). Na segunda soca os tratamentos MAP-P_{240kg} e Policote-P_{180kg} (2,1 e 2,2mg kg⁻¹) obtiveram as maiores concentrações, não diferenciando dos tratamentos MAP_{180kg}, MAP_{240kg}, MAP-P_{180kg} e Policote_{240kg}, por sua vez não diferenciaram dos demais tratamentos (Fig. 6b). Para

Cu, os tratamentos Policote_{180kg} e Policote-P_{180kg} (22,5 e 20,9mg kg⁻¹) foram as que apresentaram maiores teores (fig. 6c). Na segunda soca o tratamento MAP-P_{180kg} (3,1mg kg⁻¹) apresentou o menor teor, não diferenciando das fontes MAP_{240kg} e MAP-P_{240kg} (fig. 6d).

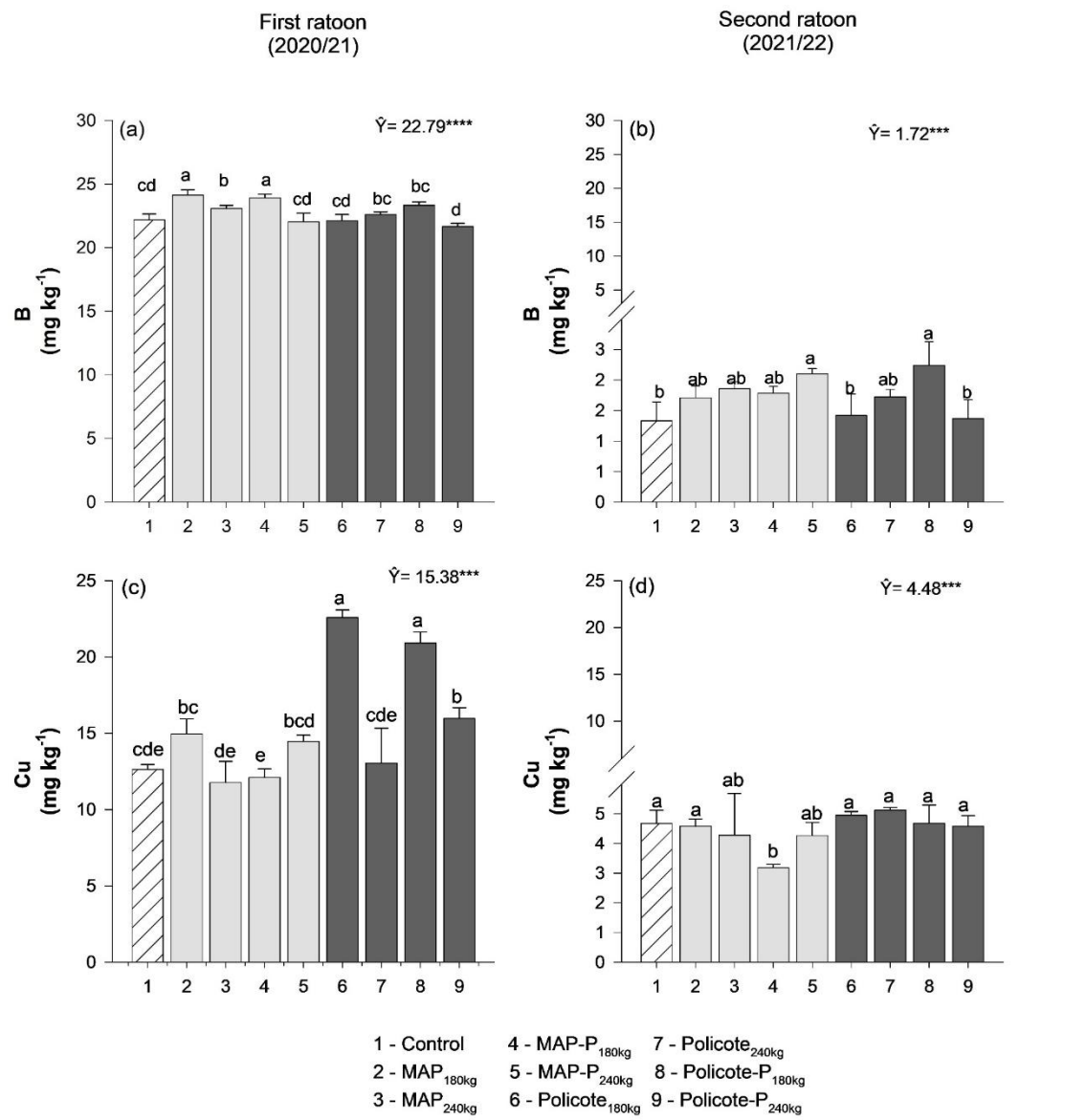


Figura 6. Teores de B e Cu foliar em resposta à fertilização com diferentes fontes e doses de fósforo, Épocas de cultivo 2020/2021 e 2021/2022.

Os teores foliares de Fe, Mn e Zn responderam aos tratamentos, a exceto a segunda soca de Zn (fig. 7f), com média de 20mg kg⁻¹. Na primeira soca o nutriente respondeu as fontes, sendo o MAP-P_{240kg} e Policote_{180kg} (25,7 e 26,8mg kg⁻¹) apresentaram os maiores teores, não diferenciando do MAP_{240kg} e Policote-P_{180kg} (25,3 e 24,8mg kg⁻¹), e o Controle (17,2 mg kg⁻¹) apresentando a menor

concentração (fig. 7e). Para o Fe, o Policote_{180kg} (125,2mg kg⁻¹) diferenciou dos demais tratamentos com maior teor foliar, e as fontes Controle e MAP_{180kg} (32,6 e 46,6mg kg⁻¹) os tratamentos com as menores concentrações (fig. 7a). Na segunda soca, os tratamentos MAP-P_{240kg} e Policote-P_{240kg} (141,9 e 137,2mg kg⁻¹) apresentaram os maiores teores, e diferindo dos demais (fig. 7b). Policote_{180kg} e Policote-P_{180kg} (84,4 e 83,6mg kg⁻¹) de Mn, apresentaram os maiores teores, não diferenciando do MAP-P_{240kg}, Policote_{240kg} e Policote-P_{240kg}, e sendo o Controle (32mg kg⁻¹) apresentou a menor concentração (fig. 7c). Na segunda soca o MAP_{180kg}, MAP_{240kg} e Policote_{180kg} (117,9, 113,2 e 108,8mg kg⁻¹ respectivamente) apresentaram os maiores teores, diferenciando dos demais (fig 7d).

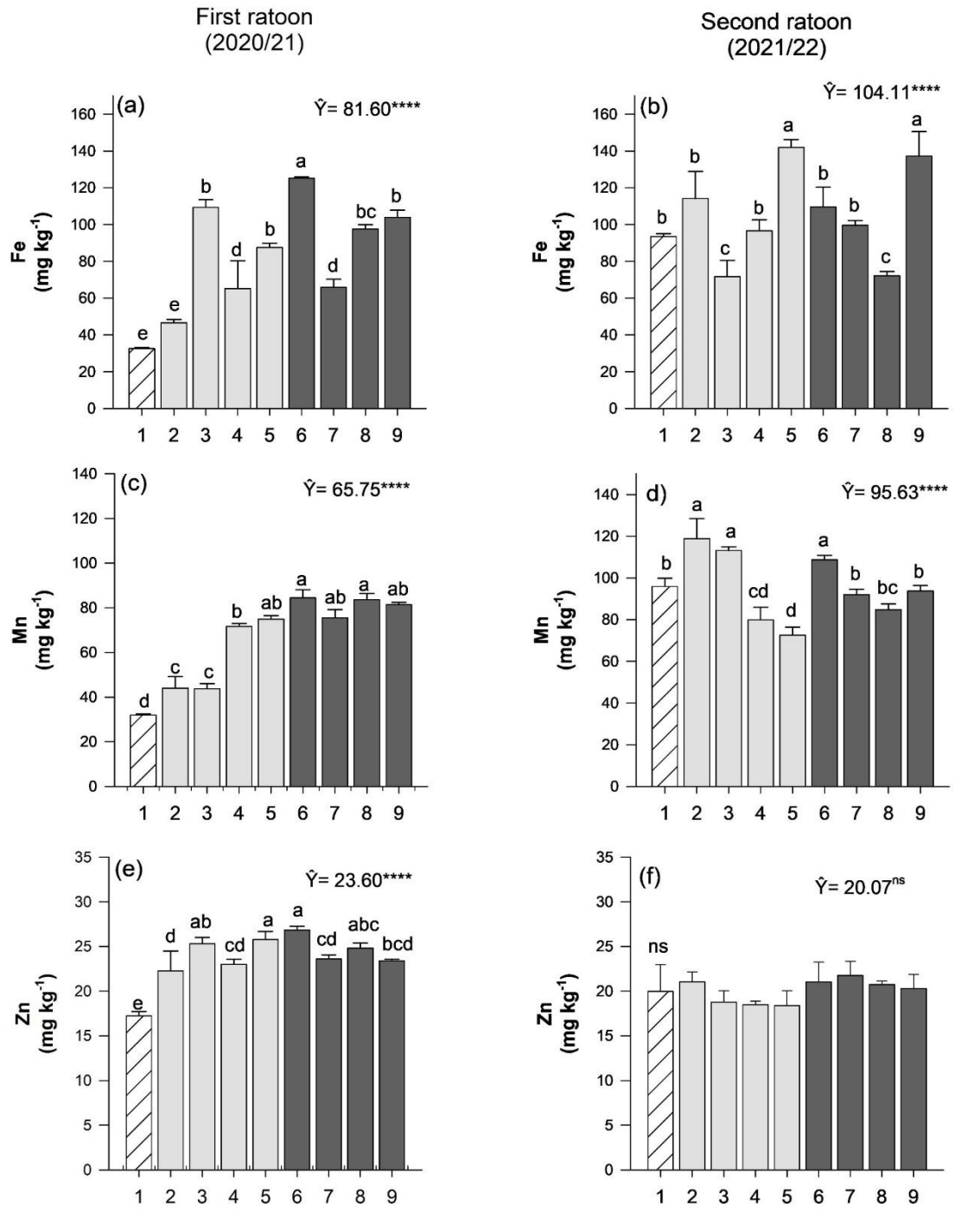


Figura 7. Teores de Zn, Mn e Fe foliar em resposta à fertilização com diferentes fontes e doses de fósforo, Épocas de cultivo 2020/2021 e 2021/2022.

3.3 Produtividade, número de colmos e Qualidade tecnológica da cana-de-açúcar 2021/2022

A produtividade da 1ª soca de cana-de-açúcar foi afetada devido a um equívoco ocorrido na usina, na qual o experimento foi colhido inadvertidamente. No entanto na 2ª soca, a produtividade e número de colmos, não apresentaram diferença estatística a produtividade média está em torno de 56,5 t.ha⁻¹, considerada baixa.

A qualidade tecnológica 2ª soca não apresentaram diferença estatística dos valores de AR, Brix, Fibra da Cana, Pol da Caldo, Pol da cana, Pureza e ATR.

Tabela 3. Produtividade e número de colmos na 2ª cana soca, adubado com doses e fontes de fósforo no sulco de plantio e parcelado, Ano agrícola 2021/2022

Fonte/ dose	Colmo (m ⁻¹)	Produtividade (t ha ⁻¹)
Controle	13,98	49,40
MAP _{180kg}	14,69	59,21
MAP _{240kg}	13,00	59,26
MAP-P _{180kg}	13,28	57,48
MAP-P _{240kg}	13,74	52,92
POLICOTE _{180kg}	12,96	56,95
POLICOTE _{240kg}	13,60	58,02
POLICOTE-P _{180kg}	12,58	53,72
POLICOTE-P _{240kg}	14,90	52,12
Pr > F	0,90	0,42
CV (%)	19,1	13,21

Tabela 4. Qualidade tecnológica, açúcares redutores (AR), teor de sólidos solúveis (Brix), Fibra da Cana, Pol (Polissacarídeos) do Caldo, Pol da Cana, Pureza e Açúcares Totais Recuperáveis (ATR) da cana-de-açúcar 2ª soca adubado com doses e fontes de fósforo no sulco de plantio e parcelado, Ano agrícola 2021/2022

Fonte	AR	BRIX	Fibra	Pol caldo	Pol cana	Pureza	ATR
	-----%-----						-kg t ⁻¹ -
Controle	0,42	22,75	14,05	21,45	17,52	93,79	172,04
MAP _{180kg}	0,61	23,87	13,87	21,09	17,29	88,37	171,10
MAP _{240kg}	0,58	23,96	14,30	21,34	17,36	89,10	171,54
MAP-P _{180kg}	0,56	23,93	14,09	21,47	17,53	89,72	173,02
MAP-P _{240kg}	0,52	23,46	13,77	21,35	17,53	91,06	172,71
POLICOTE _{180kg}	0,62	24,16	13,97	21,27	17,40	88,03	172,27
POLICOTE _{240kg}	0,54	23,82	14,06	21,48	17,54	90,28	173,26
POLICOTE- P _{180kg}	0,57	24,04	14,25	21,50	17,50	89,46	172,84
POLICOTE- P _{240kg}	0,59	23,66	13,98	21,08	17,23	89,06	170,39
Pr > F	0,56	23,71	14,01	21,29	17,40	89,79	0,17
CV (%)	15,24	3,00	2,58	2,96	2,73	2,77	18,71

4. DISCUSSÃO

A análise de ambos os extratores quantificara aumento nas concentrações de fósforo no solo, conforme era esperado. Isso se evidenciou tanto no efeito residual das aplicações no sulco de plantio, quanto nas adubações parceladas na linha de plantio. No primeiro ano de avaliação, utilizando o método de extração P-Resina, observa-se maiores concentrações de fósforo com a fonte Policote-P_{180kg} e Policote-P_{240kg} na camada de 0,00-0,10 m (Fig 2 a). Esse fenômeno pode ser atribuído à ação dos polímeros aniônicos que revestem o fertilizante fosfatado, os polímeros possuem afinidade por cátions como alumínio e ferro, o que contribui para atenuar os efeitos adversos da adsorção de fósforo no solo, aumentando, assim, a eficiência da fertilização fosfatada, conforme descrito em estudos anteriores (Chagas *et al.*, 2015, 2016a, b).

Pesquisas conduzidas por Guelfi *et al.* (2018), Ferreira *et al.* (2021), destacam uma maior eficiência do fertilizante em solos de textura mais pesada, como os solos argilosos, apontando concentrações mais elevadas em comparação com o uso do fertilizante convencional, como o MAP. Segundo Oliveira *et al.* (2022), em condições semelhantes às do nosso experimento, resultados similares foram obtidos, e a diferença na eficiência entre os dois tipos de fertilizantes pode ser atribuída ao princípio dos polímeros. Quando esses polímeros entram em contato com a solução do solo, eles liberam cargas que saturam as cargas positivas, o que reduz a adsorção e a fixação do nutriente na fração coloidal. Isso, por sua vez, torna o fósforo mais disponível para a absorção pelas plantas (EMBRAPA, 2024). É importante ressaltar que os tratamentos com fertilizantes observada neste estudo se manteve consistente ao longo de dois anos agrícolas, indicando que o efeito do polímero teve uma duração prolongada. Até o momento, não foram encontrados estudos na literatura que abordem a duração específica dessa tecnologia, o que é uma lacuna importante a ser explorada.

Um fator que pode explicar esse efeito prolongado é a textura do solo. A retenção de fósforo em solos varia significativamente com a textura, sendo mais pronunciada em solos argilosos devido à maior presença de hidróxidos de ferro e alumínio, o que reduz a disponibilidade de fósforo para as plantas, ocorre o aumento da capacidade de adsorção e reduzem a quantidade de fósforo disponível para

extração. Estudos recentes confirmam essa dinâmica: McDowell *et al.* (2020) destacam o impacto da textura na lixiviação de fósforo, Condrón *et al.* (2019) exploram sua adsorção em diferentes climas, e Li *et al.* (2021) discutem a mobilidade do fósforo em sistemas agrícolas, ressaltando a importância da textura do solo.

Em contrapartida, em solos arenosos, a retenção de fósforo é menor, o que pode ter contribuído para a ação prolongada do polímero nesse contexto. Portanto, a textura do solo desempenha um papel fundamental na resposta à aplicação do fertilizante e na eficiência do polímero em manter o fósforo disponível por um período estendido (Bortoluzzi *et al.*, 2015; Camargo *et al.*, 2014; Mumbach *et al.*, 2020; Oliveira *et al.*, 2014; Santos *et al.*, 2016a).

Nas demais profundidades 0,10-0,20m e 0,20-0,40m (Fig 2c, e). Houve diferença entre os tratamentos, indicando uma tendência a menores concentrações de fósforo na camada de 0,20-0,40 m, ressaltando a importância de considerar a distribuição vertical de fósforo no solo ao planejar estratégias de manejo agrícola. Nesse contexto, os tratamentos com Policote_{240kg} e Policote-P_{180kg} se destacaram com teores significativamente superior de fósforo extraído (Fig.2c), sugerindo uma maior eficácia desses tratamentos em aumentar a disponibilidade de fósforo nessa profundidade do solo, entretanto, não há um padrão lógico para associar a qualquer dos tratamentos, padrões esses, que se repetem no terceiro corte (Fig. 3 a, c, e). Como dito anteriormente, não há na literatura efeito residual do polímero, para estes efeitos as hipóteses levantadas são: 1- absorção da cultura pelo nutriente, em teoria, o nutriente esteve disponível por mais tempo; 2- adsorção do P pelos óxidos de Fe e Al; 3 – dessorção do P que estava adsorvido.

Os efeitos residuais do plantio, revelaram que o método Mehlich1, com o tratamento MAP_{180kg} resultou em maiores extração de fósforo na camada de 0,00-0,10 m permanecendo elevado em todas as camadas do solo no terceiro corte (Fig.2 b) e (Fig.3 b,d,f).

Os resultados indicaram que o MAP apresentou teores ligeiramente mais elevados em comparação com os polímeros ao utilizar o método M1, contrariando as concentrações obtidas pelo método P-Resina. Esta contradição, pode estar relacionada ao método, no qual, M1 extrai preferencialmente formas de P ligadas ao Ca (Bortolon; Gianello, 2010; Cassimiro *et al.*, 2022; Lemos *et al.*, 2022), ou seja, o M1 é capaz de acessar formas de P que não estão disponíveis às plantas

(Albuquerque *et al.*, 2018). O que levanta a hipótese, dos efeitos do MAP estarem também vinculados a fração ligada ao Ca, e não somente aos óxidos de Fe e Al como anteriormente mencionado. Entretanto, Oliveira (2024, dados não publicados), avaliando a fração ligada ao Ca, não identificou diferença entre as fontes, não corroborando para a hipótese, e reforçando a tese inicial, sobre a funcionalidade do polímero.

Levando em consideração os dados (Fig 2,b, d, f Fig. 3b, d, f), chega-se a respostas semelhantes ao do extrator P-Resina, o tempo de efeito do fertilizante policote tem maiores efeitos ao longo prazo. Além disso, o MAP causa nitrificação de $\text{NH}_4\text{-N}$ para $\text{NO}_3\text{-N}$ e a absorção de $\text{NH}_4\text{-N}$ pela raiz podem aumentar a dissolução de compostos de Ca-P precipitados (Chien *et al.*, 2011; Gong *et al.*, 2022a), explicando as concentrações elevadas comparados aos Policote em algumas situações.

Diversos estudos correlacionam os extratores P-Resina e M1 (Schlindwein; Gianello, 2008; Schlindwein; Bortolon, 2011; Freitas *et al.*, 2013; Cassimiro *et al.*, 2022). Esses autores correlacionam o menor teor de argila, a maiores extrações via M1, confirmando os resultados encontrados neste estudo, os quais foram, em sua grande maioria, maiores do que pelo método P-Resina. No entanto, Mumbach *et al.* (2018) identificaram resultados contrário, destacando, outros aspectos a serem observados além da textura, explicando que o efeito residual dos fosfatos naturais, frequentemente usados na fosfatagem na cultura, o extrator ácido solubiliza predominantemente P-Ca, resultando em uma superestimação do P disponível.

Além disso, a diferença entre os métodos pode estar associada à quantidade e a cristalinidade dos óxidos de ferro, os quais podem afetar o comportamento dos métodos de extração de P, juntamente com outros fatores como pH (Wuenscher *et al.*, 2015; Mumbach *et al.*, 2020). Este estudo evidencia a complexidade do P no solo, complexidade esta que aumenta com aplicação de fertilizantes fosfatados. Há necessidade de se estudar as fontes em outros extratores, para melhor conclusão sobre os possíveis efeitos dos fertilizantes.

O resultado da diagnose foliar realizada na cana-de-açúcar, de acordo com a faixa relatada por Cantarella *et al.* (2022) é possível verificar que na 1ª e 2ª cana-soca as concentrações dos macronutrientes estão na faixa adequada em termos de nutrição (fig 4 e 5). A faixa adequada de concentração de macronutrientes foliares para a cultura da cana-de-açúcar no estado de São Paulo segundo Cantarella *et al.*

(2022) em g kg^{-1} é de: 18-25 para N; 1,5-3,0 para P; 10-16 para K; 2-8 para Ca; 1-3 para Mg; 1,5-3,0 para S.

Os teores de N na segunda avaliação foram superiores com os tratamentos MAP_{180kg} MAP_{240kg} Policote_{240kg} Policote-P_{240kg}. Para os teores de P foliar na 1ª soqueira apresentou efeito significativo, sendo os tratamentos Policote-P_{180kg,240kg} e MAP_{240kg} com maiores teores, na 2ª a fonte Policote_{240kg} proporcionou maiores teores. Os resultados de P nos teores foliares, foram superiores ao encontrado por Sousa *et al.* (2015) que na cana-de-açúcar, os fertilizantes fosfatados resultaram no aumento do fósforo foliar em comparação com o controle. O MAP pode fornecer P inicialmente disponível às plantas (efeito starter), o que resulta em melhor desenvolvimento das raízes das plantas do que o uso de outros fertilizantes solúveis, além disso, há o efeito inicial benéfico dos fertilizantes de P solúveis em água, como o MAP (Chien *et al.*, 2011; Gong *et al.*, 2022b).

Raij (2011) classifica níveis de P entre 1,5 a 3,0 g kg^{-1} como adequados. Esses resultados indicam que a cana de açúcar absorve parte do fósforo aplicado. O MAP de modo geral, elevaram aos níveis mais altos de fósforo nas folhas. Teores próximos também foram encontrados em outros estudos, variando de 1,5 a 2,0 g kg^{-1} de P (Maule *et al.*, 2001). A análise dos micronutrientes revelou que os diferentes tratamentos e doses de P_2O_5 podem exercerem influência nos níveis de B, Cu e Fe nas plantas durante as duas safras avaliadas. A compreensão desses efeitos desempenha um papel crucial na otimização da nutrição das plantas e no aprimoramento da produtividade agrícola. Conforme estabelecido por Cantarella *et al.* (2022), a faixa adequada de concentração de micronutrientes foliares para a cultura da cana-de-açúcar, em mg kg^{-1} , é a seguinte: 5-15 para B, 5-15 para Cu, 40-250 para Fe, 25-100 para Mn e 10-30 para Zn.

Nas duas safras, as concentrações médias de Cu, Fe, Mn e Zn permanecem dentro da faixa adequada em termos de nutrição, com exceção da segunda cana soca, na qual os níveis de B estão abaixo do ideal.

A diagnose foliar emerge como a técnica mais precisa para avaliar o estado nutricional das plantas. No entanto, para a cana-de-açúcar, é importante reconhecer que vários fatores contribuem para a variabilidade na composição química foliar, como a variedade estudada, as características do solo, o clima e a época de amostragem. Portanto, os limites de referência apresentados refletem faixas de concentrações foliares comuns em canaviais bem supridos de nutrientes, mas não

devem ser interpretados como indicadores definitivos de deficiência. Em vez disso, eles servem como um indício ou suspeita (Cantarella *et al.*, 2022).

A produtividade da primeira safra de cana-de-açúcar foi inesperadamente afetada devido a um equívoco que ocorreu na usina, resultando na colheita inadvertida do experimento.

Contudo, na segunda safra, foi observado que a produtividade e o número de colmos não apresentaram diferenças estatísticas significativas em relação ao esperado. A produtividade média, no entanto, permaneceu em torno de 56,5 toneladas por hectare, o que, considerando as circunstâncias, ainda pode ser considerado relativamente baixo. Trabalhos com a mesma cultivar apresentaram produtividade média de 59,7 toneladas por hectare e quantidades menores de perfilhamento quando compararam com outras variedades (Look *et al.*, 2021). A baixa produtividade também pode estar associada ao déficit hídrico e altas temperaturas ocorrido ao longo do ano agrícola 2021/2022 (Fig 14). A eficiência no uso da água na cultura da cana-de-açúcar é de extrema importância no desenvolvimento de colmos e no acúmulo de sacarose. O número de colmos por planta pode acarretar uma menor produtividade da cultura (Lacerda *et al.*, 2019).

Além disso, segundo Hansel *et al.* (2017) existem preocupações de que as aplicações superficiais de fertilizantes fosfatados possam restringir a absorção de P em caso de déficit hídrico, o fertilizante em faixas profundas induziu o crescimento das raízes e a resiliência à seca. A comparação da fertilização a lanço e do agrupamento de fertilizantes a uma profundidade mais comum (5 cm), no entanto, revelou que a adubação a lanço lidou melhor com o déficit hídrico.

Pesquisas conduzida por (Costa *et al.*, 2023) também não evidenciaram aumento na produtividade da cana-de-açúcar em resposta ao método de aplicação de fósforo no solo. Este fenômeno pode ser atribuído à natureza adsorvente do solo, característica que mantém o fósforo em formas não facilmente disponíveis, limitando assim sua acessibilidade para a cana-de-açúcar, conforme destacado por (Rein *et al.*, 2022). Costa *et al.* (2014) complementam, que a cultura responde de maneira mais satisfatória à adubação fosfatada de cobertura em solos menos intemperizados. No entanto, em solos mais intemperizados, a adubação fosfatada de cobertura na cana planta não resultou em um aumento significativo na produtividade, restringindo assim sua recomendação para solos com essa característica específica. enfatizando a importância de considerar as condições

específicas do solo ao formular estratégias de adubação fosfatada para otimizar o desempenho da cultura de cana-de-açúcar.

Segundo Costa *et al.* (2019) a aplicação de doses de P_2O_5 até 200 kg ha^{-1} , no plantio, não afetou as variáveis tecnológicas no ciclo de cana planta e de cana soca. A adubação fosfatada em cobertura não alterou a qualidade tecnológica da cana soca, exceto pelo incremento em 8,9% do teor de P no caldo da planta.

Entretanto, é importante notar que a cana-soca não demonstra a mesma capacidade de resposta à adubação com fósforo, resultando em ganhos de produtividade menos significativos quando comparados à ausência da reaplicação de P, conforme evidenciado em estudos anteriores (Korndorfer; Alcarde, 1992). Isso se deve, em parte, à adsorção do ânion fosfato na superfície dos minerais de argila e à sua limitada mobilidade no solo, como discutido por Fontes e Weed (1996). Portanto, presume-se que as plantas de cana-soca não aproveitam plenamente o nutriente recém-aplicado. Essas considerações têm levado a recomendações de aplicação de quantidades reduzidas de fósforo (Prasad, 1976; Raij *et al.*, 1997a) e, em alguns casos, à exclusão completa desse nutriente nas formulações de fertilizantes normalmente utilizadas para a cultura da cana-soca (Cantarella *et al.*, 2022).

Diversos estudos observaram vantagem da adubação fosfatada na qualidade tecnológica da cana-de-açúcar (Bekheet *et al.*, 2018; Lumbanraja *et al.*, 2018), no entanto, em outros trabalhos não apresentaram efeitos positivos (Johnson *et al.*, 2017; Sousa *et al.*, 2017). Essa relação pode ser influenciada pela fonte de fósforo utilizada e pela interação desse elemento com o solo. É importante observar que esses estudos foram conduzidos em regiões canavieiras que possuem solos altamente intemperizados, caracterizados por um alto poder de fixação de fósforo (Costa *et al.*, 2014; Santos *et al.*, 2016a).

Nesse cenário, é de extrema importância conduzir estudos mais abrangentes sobre a fertilização com fósforo em solos arenoso. Isso decorre da constatação de que a aplicação inadequada de fertilizantes fosfatados nesses solos pode resultar em uma liberação insuficiente de fósforo ao longo do ciclo de cultivo. Portanto, a pesquisa e a correta implementação da adubação fosfatada se apresentam como elementos cruciais para otimizar o rendimento agrícola na região.

A produtividade da primeira safra de cana-de-açúcar foi inesperadamente afetada devido a um equívoco que ocorreu na usina, resultando na colheita inadvertida do experimento. Esse contratempo teve um impacto significativo na pesquisa, prejudicando os resultados planejados para comparações entre os anos de avaliações. Contudo, na segunda safra, foi observado que a produtividade e o número de colmos não apresentaram diferenças estatísticas significativas em relação ao esperado. A produtividade média, no entanto, permaneceu em torno de 56,5 toneladas por hectare, o que, considerando as circunstâncias, ainda pode ser considerado relativamente baixo.

A baixa produtividade pode estar associada ao déficit hídrico ocorrido ao longo do ano agrícola 2021/2022, bem como a variedade CTC 9001 que, ao contrário as expectativas no seu lançamento, apresenta problemas de desenvolvimento/estabelecimento sob as condições de solo e clima do Oeste Paulista. A aplicação de fósforo promoveu o estabelecimento de uma boa população de colmos, embora a magnitude de resposta para adubação fosfatada no plantio e na soqueira de cana-de-açúcar seja distinta.

Outro aspecto são os valores da qualidade tecnológica, como AR, Brix, Fibra da Cana, Pol do Caldo, Pol da Cana, Pureza e ATR que não apresentaram diferenças estatísticas significativas. Esses resultados sugerem que, apesar do contratempo inicial, a qualidade da cana-de-açúcar, em termos de sua composição química e características essenciais, permaneceu consistente. Isso pode ser um indicativo de que as práticas de cultivo e o manejo pós-colheita manteve a qualidade do produto, mesmo diante de desafios inesperados.

A manutenção da qualidade química da cana-de-açúcar é fundamental para a indústria sucroalcooleira, pois influencia diretamente na produção de açúcar, etanol e outros produtos derivados. Portanto, apesar da redução na produtividade na primeira safra, as propriedades químicas da cana permaneceram estáveis, indicando que a qualidade do produto não foi comprometida de maneira significativa.

Nesse cenário, é de extrema importância conduzir estudos mais abrangentes sobre a fertilização com fósforo em solos da região do Oeste paulista. Isso decorre da constatação de que a aplicação inadequada de fertilizantes fosfatados nesses solos pode resultar em uma liberação insuficiente de fósforo ao longo do ciclo de cultivo. Portanto, a pesquisa e a correta implementação da adubação fosfatada se apresentam como elementos cruciais para otimizar o rendimento agrícola na região.

5. CONCLUSÃO

Com base na análise realizada, verificou-se que a disponibilidade de fósforo no solo arenoso, onde se cultiva cana-de-açúcar, é claramente influenciada pelo tipo de fertilizante utilizado. Notadamente, a fonte com Policote demonstrou um efeito residual positivo, mantendo elevadas concentrações de fósforo, sobretudo quando analisado pelo método P-resina. Escolhas criteriosas da fonte e gestão apropriada das doses são cruciais para otimizar a nutrição da cana. Os efeitos dessas escolhas são observáveis no estado nutricional das plantas, que mostraram aumento nos teores foliares de P_2O_5 .

A produtividade foi impactada negativamente. Recomenda-se a realização de novos experimentos que considerem variáveis adicionais como déficit hídrico, temperatura, variedade de cana e características do solo na região do Oeste paulista, visto que os resultados apontam promissoras direções para o manejo eficiente de fósforo na cultura da cana-de-açúcar.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, A. S.; FONSÊCA, N. C.; DOS SANTOS, R. V.; MEDEIROS, W. P. (2018). Atributos químicos em solo salino-sódico e efeito do ácido sulfúrico no crescimento da *Prosopis juliflora*. *Revista de Ciências Agrárias Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences*, 61.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. DE M.; SPAROVEK, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Metz*, 22, 711–728. Disponível em: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.
- BALLOTIN, F. C.; POGORZELSKI, D.; SANTOS, W. O.; PIMENTEL, G. G.; MATIAS, P. C.; VERGUTZ, L. (2022). Do we properly quantify P from Mehlich 1 or Mehlich 3 extracting solutions?
- BARRA, P. J.; PONTIGO, S.; DELGADO, M.; PARRA-ALMUNA, L.; DURAN, P.; VALENTINE, A. J.; JORQUERA, M. A.; DE LA LUZ MORA, M. (2019). Phosphobacteria inoculation enhances the benefit of P-fertilization on *Lolium perenne* in soils contrasting in P-availability. *Soil Biology and Biochemistry*, 136, 107516.
- BEKHEET, M. A.; GADALLAH, A. F.; KHALIFA, Y. A. (2018). Enhancement of Yield and Quality of Sugarcane by Applied Nitrogen, Phosphorus and Filter Cake. *Egyptian Journal of Agronomy*, 40, 207–221.
- BORTOLON, L.; GIANELLO, C. (2010). Simultaneous multielement extraction with the Mehlich-1 solution for Southern Brazilian soils determined by ICP-OES and the effects on the nutrients recommendations to crops. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 34, 125–132. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000100013>.
- BORTOLUZZI, E. C.; PÉREZ, C. A.; ARDISSON, J. D.; TIECHER, T.; CANER, L. (2015). Occurrence of iron and aluminum sesquioxides and their implications for the P sorption in subtropical soils. *Applied Clay Science*, 104, 196–204.
- CAMARGO, L. A.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; BAHIA, A. S. R. DE S. (2014). Clay mineralogy and magnetic susceptibility of Oxisols in geomorphic surfaces. *Scientia Agricola*, 71, 244–256.

CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; MATTOS JR, D.; BOARETTO, R. M.; RAIJ, B. VAN. (2022). Boletim 100: Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo, 1ª ed. Instituto Agronômico de Campinas.

CARNEIRO, K. A. A.; MORO, L.; MACEDO, R. S.; DE ARAÚJO NETO, R. N.; DOS SANTOS SOUSA, C.; DE BAKKER, A. P. (2023). Fósforo disponível extraído por Mehlich 1 e Olsen em Luvisolo sob agroecossistemas do Semiárido brasileiro. *Revista Brasileira de Meio Ambiente*, 11.

CHAGAS, W. F. T.; EMRICH, E. B.; GUELFI, D. R.; CAPUTO, A. L. C.; FAQUIN, V. (2015). Productive characteristics, nutrition and agronomic efficiency of polymer-coated MAP in lettuce crops. *Revista Ciência Agronômica*, 46, 266–276.

CHAGAS, W. F. T.; GUELFI, D. R.; CAPUTO, A. L. DE C.; DOMINGHETTI, A. W.; FAQUIN, V.; LOPES, R. M.; CHAGAS, R. M. R. (2016a). Eficiência agrônômica do superfosfato triplo revestido por polímeros no crescimento inicial do cafeeiro.

CHAGAS, W. F. T.; GUELFI, D. R.; EMRICH, E. B.; SILVA, A. L.; FAQUIN, V. (2016b). Agronomic efficiency of polymer-coated triple superphosphate in onion cultivated in contrasting texture soils. *Revista Ciência Agronômica*, 47, 439–446.

CHIEN, S.; PROCHNOW, L.; TU, S.; SNYDER, C. (2011). Agronomic and environmental aspects of phosphate fertilizers varying in source and solubility: An update review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 89, 229–255. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10705-010-9390-4>.

COSTA, D. B. da; FREIRE, F. J.; SANTOS, R. L. dos; SANTOS, H. C.; OLIVEIRA, A. C. de; ANDRADE, P. K. B. de (2019). Technological quality of plant sugarcane and ratoon cultivated under phosphate fertilization in soils of different textures. *Revista Geama*, 5, 40–46.

COSTA, D. B. D.; NETO, D. E. S.; FREIRE, F. J.; DE ECA (2014). Adubação fosfatada em cana planta e soca em argissolos do nordeste de diferentes texturas. *Revista Caatinga*, 27, 10.

DA COSTA, D. batista; FREIRE, F. J.; DE ANDRADE, J. J.; DA SILVA, S. R. V.; DOS SANTOS, R. L.; SANTOS, H. C.; DE OLIVEIRA, A. C.; SIMÕES NETO, D. E. (2023). Phosphorus Agronomic Efficiency Index Under Different Fertilizer Application Methods in Two Cycles of Sugarcane Cultivated in Tropical Soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 54, 2376–2393. <https://doi.org/10.1080/00103624.2023.2223570>.

DE ALMEIDA, R. E. M. (2016). Fertilizantes de aumentada: uso de ureia de liberação controlada ou com inibidores em sistemas agrícolas. *Embrapa Pesca e Aquicultura-Documents (INFOTECA-E)*.

DE SOUSA, R. T. X.; KORNDÖRFER, G. H.; BREM SOARES, R. A.; FONTOURA, P. R. (2015). Phosphate Fertilizers for Sugarcane Used at Pre-Planting (Phosphorus Fertilizer Application). *Journal of Plant Nutrition*, 38, 1444–1455. <https://doi.org/10.1080/01904167.2014.990567>.

FAO. (2020). Food and Agriculture Organization of the United Nations. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>. Acesso em: 31 jan. 2023.

FERREIRA, B. da S.; SANTANA, M. V.; CABRAL, R. da S.; MATIELLO, E.; REIS Jr, R. dos A. (2021). Soybean and Corn crop response to enhanced efficiency phosphate fertilizer. *IJHAF*, 5, 1–9. Disponível em: <https://doi.org/10.22161/ijhaf.5.1.1>.

FONTES, M. P. F.; WEED, S. B. (1996). Phosphate adsorption by clays from Brazilian Oxisols: relationships with specific surface area and mineralogy. *Geoderma*, 72, 37–51. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(96\)00010-9](https://doi.org/10.1016/0016-7061(96)00010-9).

FREIRE, F. J.; SILVA, F. C. da; CARVALHO, M. L. de; VENEGAS, V. H. A. (2022). Modelagem para otimização da calagem e adubação na cultura de cana-de-açúcar. *Bioenergia em Revista: Diálogos*, 12, 09–29.

FREITAS, I. F. de; NOVAIS, R. F.; VILLANI, E. M. de A.; NOVAIS, S. V. (2013). Phosphorus extracted by ion exchange resins and mehlisch-1 from oxisols (latosols) treated with different phosphorus rates and sources for varied soil-source contact periods. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 37, 667–677. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000300013>.

GONG, H.; MENG, F.; WANG, G.; HARTMANN, T. E.; FENG, G.; WU, J.; JIAO, X.; ZHANG, F. (2022a). Toward the sustainable use of mineral phosphorus fertilizers for crop production in China: From primary resource demand to final agricultural use. *Science of the Total Environment*, 804. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150183>.

GONG, H.; MENG, F.; WANG, G.; HARTMANN, T. E.; FENG, G.; WU, J.; JIAO, X.; ZHANG, F. (2022b). Toward the sustainable use of mineral phosphorus fertilizers for crop production in China: From primary resource demand to final agricultural use. *Science of The Total Environment*, 804, 150183. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150183>.

GUELFY, D. R.; CHAGAS, W. F. T.; LACERDA, J. R.; CHAGAS, R. M. R.; SOUZA, T. L. de; ANDRADE, A. B. (2018). Monoamônio fosfato revestido com polímeros e magnésio para plantas de café. *Ciência e Agrotecnologia*, 42, 261–270.

HANSEL, F. D.; AMADO, T. J. C.; RUIZ DIAZ, D. A.; ROSSO, L. H. M.; NICOLOSO, F. T.; SCHORR, M. (2017). Phosphorus fertilizer placement and tillage affect soybean root growth and drought tolerance. *Agronomy Journal*, 109, 2936–2944. Disponível em: <https://doi.org/10.2134/agronj2017.04.0202>.

HEINRICHS, R.; OTTO, R.; MAGALHÃES, A.; MEIRELLES, G. (2017). Importance of sugarcane in Brazilian and world bioeconomy. Springer Nature. S. Dabber, Switzerland.

HELIN, J.; WEIKARD, H.-P. (2019). A model for estimating phosphorus requirements of world food production. *Agricultural Systems*, 176, 102666.

JOHNSON, R. M.; VIATOR, H. P.; STEVENS, J. C.; TUBAÑA, B. S. (2017). Sugarcane yields do not respond to phosphorus fertilizer in ratoon crops of LCP 85-384 in Louisiana. *Journal of the American Society of Sugar Cane Technologists*.

JUNIOR, R. dos A. R.; SILVA, D. R. G. (2012). Avaliação das características físicas e físico-químicas de fertilizantes nitrogenados e fosfatados revestidos por polímeros.

KORALAGE, I. S. A.; SILVA, N. R. N.; DE SILVA, C. S. (2015). The determination of available phosphorus in soil: a quick and simple method.

KORNDÖRFER, G. H.; ALCARDE, J. C. (1992). Aplicação de fósforo e rendimento de cana soca e ressoça. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 16, 183–186.

LACERDA, A. R. da S.; SOUZA, A. R. de; SANTOS, T. M. dos; CLEMENTE, J. M.; DUARTE, A. R.; MACHADO, M. G. (2019). Produtividade da cana-de-açúcar em resposta a adubação NPK em diferentes épocas. *Humanidades e Tecnologia (FINOM)*, 18, 45–51.

LEMOS, J. de O.; FREIRE, F. J.; SOUZA JÚNIOR, V. S. de; OLIVEIRA, E. C. A. de; LUCENA, P. G. C. de; SILVA, S. R. V. da; FREIRE, M. B. G. dos S.; LIMA, D. R. M. de (2022). Phosphorus fractions in soils with distinct mineralogy and their relationship with phosphate buffer capacity indicators in Brazil. *Acta Scientiarum Agronomy*, 44, e55148.

LOOK, L. E. R.; STAUT, L. A.; KURIHARA, C. H.; da SILVA, C. J.; LOOK, L. E. R. (2021). Produtividade da cana-de-açúcar após consórcio entre gramíneas e leguminosas, com doses de fosfato.

LOPES, C. M.; SILVA, A. M. M.; ESTRADA-BONILLA, G. A.; FERRAZ-ALMEIDA, R.; VIEIRA, J. L. V.; OTTO, R.; VITTI, G. C.; CARDOSO, E. J. B. N. (2021). Improving the fertilizer value of sugarcane wastes through phosphate rock amendment and phosphate-solubilizing bacteria inoculation. *Journal of Cleaner Production*, 298, 126821.

LUMBANRAJA, J.; SATGADA, C. P.; SARNO, S.; UTOMO, M.; HASIBUAN, R.; DERMIYATI, D.; TRIYONO, S. (2018). Phosphorus (P) Adsorption Behavior and Harvested P by the Sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) Affected by Inorganic and Organic Fertilizer Applications on an Ultisol. *Journal of Tropical Soils*, 23, 35–45. <https://doi.org/10.5400/jts.2018.v23i1.35-45>.

MALAVOLTA, E. (1997). Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. Piracicaba: Potafos.

MAULE, R. F.; MAZZA, J. A.; MARTHA Jr, G. B. (2001). Produtividade agrícola de cultivares de cana-de-açúcar em diferentes solos e épocas de colheita. *Scientia Agrícola*, 58, 295–301.

MUMBACH, G. L.; GATIBONI, L. C.; DALL'ORSOLETTA, D. J.; SCHMITT, D. E.; PESSOTTO, P. P.; DE OLIVEIRA, C. M. B. (2020). Phosphorus Extraction with Soil

Test Methods Affected by Soil P Sorption Capacity. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20, 1882–1890. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00259-1>.

MURPHY, J.; RILEY, J. P. (1962). A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta*, 27, 31–36. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(00\)88444-5](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(00)88444-5).

OLIVEIRA, C. L. B. de; CASSIMIRO, J. B.; LIRA, M. V. da S.; BONI, A. da S.; DONATO, N. de L.; REIS, R. dos A.; HEINRICHS, R. (2022). Sugarcane Ratoon Yield and Soil Phosphorus Availability in Response to Enhanced Efficiency Phosphate Fertilizer. *Agronomy*, 12, 2817. <https://doi.org/10.3390/agronomy12112817>.

PIMENTEL-GOMES, F. (2009). *Curso de estatística experimental*. 15ª ed. ESALQ, 2009, Piracicaba.

PRASAD, M. (1976). Response of Sugarcane to Filter Press Mud and N, P, and K Fertilizers. I. Effect on Sugarcane Yield and Sucrose Content. *Agronomy Journal*, 68, 539–543. <https://doi.org/10.2134/agronj1976.00021962006800040002x>.

RAIJ, B. V.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. (2001). *Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais*. Instituto Agrônomo de Campinas, Campinas.

RAIJ, B. V.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (1997). *Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo*. Instituto Agrônomo/Fundação IAC, Campinas.

RAIJ, B. V. *Fertilidade do solo e manejo de nutrientes*. International Plant Nutrition Institute. 2011.

REIN, T. A.; DOS SANTOS, J. de D. G.; DE SOUSA, D. M. G.; DE CARVALHO, W. P.; DE CASTRO LEMES, G. (2022). Adubação fosfatada corretiva e de manutenção na produtividade de cana-de-açúcar em Latossolos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 56, 02160.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAUJO FILHO, J. C. de; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. (2018). *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. Brasília, DF: Embrapa.

SANTOS, H. C.; DE OLIVEIRA, F. H.; SOUZA, A. P. de; SALCEDO, I. H.; SILVA, V. D. (2016). Phosphorus availability as a function of its time of contact with different soils. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 20, 996–1001.

SAS®. (2022). *SAS OnDemand for Academics*. Disponível em: <https://welcome.oda.sas.com/home>. Acesso em: 9 fev. 2022.

SCHLINDWEIN, J. A.; BORTOLON, L. (2011). Soil Phosphorus Available for Crops and Grasses Extracted with Three Soil-Test Methods in Southern Brazilian Soils

Amended with Phosphate Rock. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 42, 283–292. <https://doi.org/10.1080/00103624.2011.538881>.

SCHLINDWEIN, J. A.; GIANELLO, C. (2008). Nível de suficiência e índice de equivalência entre o fósforo determinado pelos métodos da resina de troca iônica e mehlich-1. *Current Agricultural Science and Technology*, 14, 299–306. <https://doi.org/10.18539/cast.v14i2.1916>.

SOIL SURVEY DIVISION. (2014). *Keys to Soil Taxonomy*, 12th ed. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, Washington, D.C.

SOUSA, P. R. de; BRUNHARO, C. A.; FURLANI, C. E.; PRADO, R. de M.; MALDONADO, W.; ZERBATO, C. (2017). Phosphorus fertilization in sugarcane cultivation under different soil managements. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 21, 665–669.

SOUSA, D. martinhão gomes. NUNES, R. de S.; REIN, T. A.; SANTOS JÚNIOR, J. de D. G. (2016). *Manejo da Adubação Fosfatada para Culturas Anuais no Cerrado*. Embrapa.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; ANGHINONI, I.; BISSANI, C. A.; CAMARGO, F. A. O.; WIETHÖLTER, S. (2004). *Manual de Adubação e Calagem*, 10ª ed. Comissão de Química e Fertilidade do Solo - RS/SC, Porto Alegre.

VITTI, G. C.; DE CERQUEIRA LUZ, P. H.; ALTRAN, W. S. (2015). Nutrition and fertilization. In: *Sugarcane*. Elsevier, pp. 53–88.

WITHERS, P. J.; RODRIGUES, M.; SOLTANGHEISI, A.; DE CARVALHO, T. S.; GUILHERME, L. R.; BENITES, V. de M.; GATIBONI, L. C.; DE SOUSA, D. M.; NUNES, R. de S.; ROSOLEM, C. A. (2018). Transitions to sustainable management of phosphorus in Brazilian agriculture. *Scientific Reports*, 8, 1–13.

WUENSCHER, R.; UNTERFRAUNER, H.; PETICZKA, R.; ZEHETNER, F. (2015). A comparison of 14 soil phosphorus extraction methods applied to 50 agricultural soils from Central Europe. *Plant, Soil and Environment*, 61, 86–96. Disponível em: <https://doi.org/10.17221/932/2014-PSE>.

ZAVASCHI, E.; DE ABREU FARIA, L.; FERRAZ-ALMEIDA, R.; DO NASCIMENTO, C. A. C.; PAVINATO, P. S.; OTTO, R.; VITTI, A. C.; VITTI, G. C. (2020). Dynamic of P Flux in Tropical Acid Soils Fertilized with Humic Acid–Complexed Phosphate. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20, 1937–1948. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00265-3>.

ZUCARELI, C.; BARZAN, R. R.; SILVA, J. B. da; CHAVES, D. P. (2018). Associação de fosfatos e inoculação com *Bacillus subtilis* e seu efeito no crescimento e desempenho produtivo do feijoeiro. *Revista Ceres*, 65, 189–195. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0034-737X201865020011>.

Capítulo II

LABILIDADE DO FÓSFORO EM SOLO CULTIVADO COM CANA-DE-AÇUCAR ADUBADO COM FOSFATADO REVESTIDO

RESUMO

No Brasil a cultura da cana-de-açúcar, apresenta elevada expansão na produção, devido ao avanço e busca por produção de energia renovável, tanto pelo etanol quanto cogeração de energia. Além disso, a cultura também pode ser utilizada na extração do açúcar e alimentação animal. Este estudo avaliou a eficácia de fertilizantes fosfatados revestidos na disponibilidade de fósforo (P) em solos cultivados com cana-de-açúcar. O experimento foi conduzido durante duas safras (2020/21 e 2021/22) em uma usina sucroenergética em São Paulo, utilizando fertilizantes fosfatados revestidos com polímero (MAP-P) e convencionais (MAP), em diferentes doses. O objetivo foi analisar o impacto desses fertilizantes na dinâmica do P no solo e na disponibilidade para a planta. Os resultados mostraram que os fertilizantes fosfatados revestidos aumentaram significativamente a disponibilidade de P lábil em comparação aos fertilizantes convencionais. Na camada de 0,00-0,10 m, os tratamentos com MAP-P e Policote-P apresentaram os maiores teores de P lábil. A análise das frações de fósforo revelou que os tratamentos com Policote-P foram mais eficazes na manutenção de formas de P moderadamente lábeis e na redução da fixação de P em formas não lábeis. Na profundidade de 0,20-0,40 m, os tratamentos com Policote mostraram maior disponibilidade de P, especialmente em formas orgânicas. Os resultados indicam que fertilizantes fosfatados revestidos são mais eficientes, melhorando a disponibilidade do nutriente para as plantas e potencialmente reduzindo a necessidade de aplicações frequentes. Além disso, esses fertilizantes têm menor impacto ambiental, minimizando a lixiviação e a fixação excessiva do P no solo. A escolha adequada de fertilizantes é crucial para otimizar a nutrição das plantas e promover práticas agrícolas sustentáveis.

Palavras-chave: lábil, fosfatagem, fracionamento.

PHOSPHORUS LABILITY IN SOIL CULTIVATED WITH SUGARCANE FERTILISED WITH COATED PHOSPHATE

ABSTRACT

In Brazil, the sugarcane industry is undergoing significant expansion due to the advancement of renewable energy production, particularly ethanol and cogeneration. Additionally, the crop can be used for sugar extraction and animal feed. This study evaluated the efficacy of phosphatic fertilizers in enhancing the availability of phosphorus (P) in cultivated sugarcane soils. The experiment was conducted over two crop cycles (2020/21 and 2021/22) at a sugarcane ethanol plant in São Paulo, Brazil. Fertilizers were applied in different doses, including phosphatic fertilizers coated with a polymer (MAP-P) and conventional phosphatic fertilizers (MAP). The objective was to analyse the impact of these fertilizers on the dynamics of phosphorus (P) in the soil and its availability to the plant. The findings indicated that the phosphatic fertilizers with a coating significantly enhanced the availability of labile phosphorus in comparison to the conventional fertilizers. In the 0.00-0.10 m layer, the treatments with MAP-P and Policote-P exhibited the highest levels of labile P. The analysis of the phosphorus fractions demonstrated that the Policote-P treatments were more effective in maintaining moderately labile phosphorus forms and reducing the fixation of phosphorus in non-labile forms. At a depth of 0.20-0.40 m, the treatments with Policote demonstrated a greater availability of P, particularly in organic forms. The results indicate that coated phosphate fertilizers are more efficient, improving the availability of nutrients for plants and potentially reducing the need for frequent applications. Furthermore, these fertilisers have a lower environmental impact, minimising the leaching and excessive fixation of phosphorus in the soil. The appropriate choice of fertilizers is crucial for optimising plant nutrition and promoting sustainable agricultural practices.

Keywords: labile, phosphatisation, fractionation.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil a cultura da cana-de-açúcar, apresenta elevada expansão na produção, devido ao avanço e busca por produção de energia renovável, tanto pelo etanol quanto cogeração de energia. Além disso, a cultura também pode ser utilizada na extração do açúcar e alimentação animal (Heinrichs *et al.*, 2017). A demanda por alimentos e preocupações com a segurança alimentar mundial são consequências de uma expectativa de crescimento populacional ao longo dos próximos anos, trazendo consigo a necessidade de alcances cada vez maiores de produtividades agrícolas, que por sua vez serão sustentadas, dentre os diversos insumos, por fertilizantes minerais (Helin; Weikard, 2019). A Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO), estimou um crescimento médio de 1,9% ao ano na demanda mundial por fertilizantes, que alcançou no ano de 2020 cerca de 201 milhões de toneladas, destes, 46 milhões de toneladas corresponderam aos fertilizantes fosfatados (FAO, 2020). Nossa agricultura possui grande dependência aos fertilizantes fosfatados, decorrente do papel que o fósforo (P) tem (Corbridge, 2013).

A maior parte dos solos brasileiros pertence às classes dos Latossolos e Argissolos, representando, aproximadamente, 58% de área territorial do país, sendo caracterizados como solos intemperizados, ácidos, de baixa a média fertilidade natural e, em vários sítios, saturados por alumínio (Santos *et al.*, 2018). Verifica-se forte interação do fosfato com o solo neste ambiente edáfico, formando compostos de baixa solubilidade ligados a diferentes combinações com ferro (Fe), alumínio (Al) e cálcio (Ca) ou adsorvidos quimicamente na superfície dos colóides minerais; processos que, de maneira geral e de forma indistinta, são denominados de fixação de fósforo (Rolim Neto *et al.*, 2004).

A baixa disponibilidade de P nos solos se deve geralmente a processos de precipitação e adsorção das formas inorgânicas. O grau de adsorção de P é maior em solos com textura argilosa, contendo íons de ferro e alumínio, apresentando fixação de P maior em solos com maior proporção de argila (Johri *et al.*, 2015; Santos *et al.*, 2016)

Nas adubações, o P é geralmente fornecido às plantas na forma de fertilizantes fosfatados solúveis como é o caso do fosfato monoamônio, sendo necessárias altas doses para se obterem produções comerciais (Sousa *et al.*, 2016), devido a absorção de fósforo pelas raízes das plantas que é feita predominantemente por processo dependente da difusão do P no solo, que ocorre numa taxa muito lenta para atender às necessidades das plantas. Algumas estratégias encontradas pelas indústrias foi o desenvolvimento de novas tecnologias, como os fertilizantes que são caracterizados por grânulos revestidos com substâncias inorgânicas (polímeros sintéticos) (Almeida, 2016), gerando menor fixação de fósforo no solo, aumentando sua disponibilidade para as plantas. Uma alternativa econômica para a fertilização da cana-de-açúcar, é o uso de fosfato de rocha (Sousa *et al.*, 2015). Caracteriza-se por sua baixa solubilidade e notável efeito residual, o que resulta em uma eficácia aprimorada ao longo do tempo após a aplicação. Assim, torna-se crucial adotar estratégias que incrementem a disponibilidade de fósforo, de forma a assegurar seu uso satisfatório (Bonilla *et al.*, 2021).

Devido à notável interação do fósforo com os diversos elementos presentes no solo e, sobretudo, em virtude de sua importância crítica para o desenvolvimento da cana-de-açúcar, a necessidade de estudos nessa área é crescente. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo analisar os impactos da aplicação de fosfato no desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.2 Localização e características da área experimental

O experimento foi realizado durante duas safras (2020/21 e 2021/22) em área comercial, na unidade produtora da usina sucroenergética Ipê localizada no município de Monte Castelo na região Oeste do Estado de São Paulo, latitude 21°

12°57.26" S, longitude 51° 35'4,45" W e altitude 309m. A variedade usada foi a CTC 9001. O solo é classificado como ARGISSOLO VERMELHO AMARELO DISTRÓFICO, com textura arenosa (Santos *et al.*, 2018), correspondendo a um Ultisol (Soil Survey Division 2014) (Table 1). O clima local, conforme a classificação de Koppen é do tipo Cw, caracterizado pelas estações de clima quente de inverno seco (Alvares *et al.*, 2013). As médias anuais de temperatura e precipitação são, respectivamente, 24°C e 1.300 mm, com temperatura média máxima de 31°C e média mínima de 19°C, os dados pluviométricos foram medidos durante o experimento.

Table 1. Atributos químicos e granulometria do solo da área experimental na profundidade de 0,0-0,1m; 0,1-0,2m, 0,2-0,4m, Monte Castelo, SP, 2018.

Depth	pH	MO	P	K	Ca	Mg	H+Al	Al	SB	CTC
m		g dm ⁻³	mg dm ⁻³	mmol _c dm ⁻³						
0.0-0.1	6	15	20	0.7	25	11	11	0	36.7	47.7
0.1-0.2	5.2	10	7	0.7	16	6	12	0	22.7	34.7
0.2-0.4	4.4	9	14	0.5	5	4	15	2	9.5	24.5
Prof.	V	m	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn		
m	-----%-----	-----mg dm ⁻³ -----								
0.0-0.1	77	0	12	0.08	0.7	10.1	24	1.6		
0.1-0.2	65	0	9	0.05	0.8	9.2	27.3	0.4		
0.2-0.4	39	17	14	0.05	1.1	9.8	26.4	0.2		

P, Ca, Mg, e K: resina trocadora de íons; S: fosfato de cálcio; B: água quente; SB: soma de bases (K+Ca+Mg); Cu, Fe, Mn e Zn: DTPA em pH 7,3; CTC: capacidade de troca de cátions.

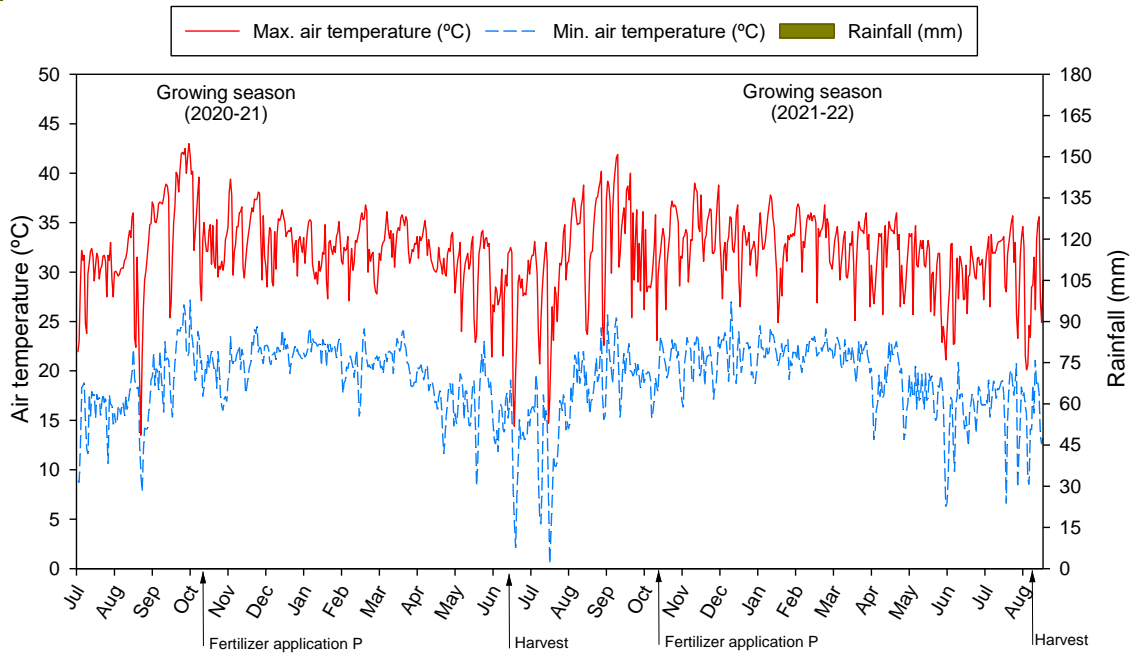


Figura 1. Condições climáticas nos anos agrícolas 2020/21 e 2021/22.

2.2 Delineamento experimental e tratamentos

O experimento foi realizado nos anos agrícolas de 2020/21 e 2021/22 em blocos ao acaso com quatro repetições, totalizando 9 tratamentos, composto de duas fontes fosfatadas fosfato monoamônio revestida com polímero (MAP+P, 10% N, 49% P_2O_5) e Fosfato monoamônio convencional (MAP, 11% N, 52% P_2O_5), e duas doses 180 e 240 kg P_2O_5 ha⁻¹ no sulco de plantio e parcelado (o parcelamento foi aplicado em superfície, sobre a linha de cultura), acrescido um tratamento sem adubação (sem P), o produto composto por polímeros aniônicos são solúveis com 93,7% de biodegradabilidade. A função é diminuir a atividade de Fe^{2+} e Al^{3+} próximo aos grânulos de MAP e diminuir as reações de precipitação de P com estes cátions. Outra finalidade é melhorar as características físicas e físico-químicas dos fertilizantes, aumentando a dureza e reduzindo a acidez livre, a higroscopicidade e a tendência do fertilizante em formar poeira (Junior; Silva, 2012). A adubação de plantio para N e K foram de acordo com a recomendação oficial do estado de São Paulo, dentro das respectivas faixas de interpretação Raij *et al.* (1997). Após 143 (06/09/2019) dias após o plantio (quebra lombo) foi realizado a adubação de cobertura com 120 kg ha⁻¹ de K_2O via cloreto de potássio (60% de K_2O) em função da análise do solo e a complementação da adubação nitrogenada com ureia, para

atingir 90 kg ha⁻¹ de N via sulfato de amônio (24% de S; 21% de N) e ureia (45% de N) em função da expectativa de produção.

Tabela 2. Descrição dos tratamentos utilizados na cultura da cana-de-açúcar, no período de três anos

Tratamentos	Fonte	Cana-planta	1ª Soca	2ª Soca	Total
	P	(1º corte)	(2º corte)	(3º corte)	(kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)
		----- kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹ -----			
1	Controle	-	-	-	-
2	MAP	180	-	-	180
3	MAP	240	-	-	240
4	MAP-P	120	60	-	180
5	MAP-P	120	60	60	240
6	Policote	180	-	-	180
7	Policote	240	-	-	240
8	Policote-P	120	60	-	180
9	Policote-P	120	60	60	240

Policote - Fosfato monoamônio com polímero: 10%N 49%P₂O₅;

MAP - Fosfato monoamônio sem polímero: 11%N 52%P₂O₅;

Policote-P e MAP-P – Fontes parceladas

2.3 Instalação e condução do experimento

A área foi preparada para o plantio de cana-de-açúcar em janeiro de 2019, foi realizado a aplicação de 1,5 t ha⁻¹ de calcário dolomítico (PRNT 90%), seguido com aplicação de 1 t ha⁻¹ de gesso agrícola, fosfatagem de 0,6 t ha⁻¹ de Fosforita (27% P₂O₅) e em seguida foi realizada a subsolagem com equipamento provido de 7

hastes manejado na profundidade de 0,45 m. Os fertilizantes fosfatados foram aplicados no sulco de plantio, antes da acomodação dos colmos sementes. As parcelas experimentais foram de 144 m², formada por 6 linhas de cana-de-açúcar, com espaçamento de 1,5 m nas entre linhas e 20 m de comprimento, colheita foi realizada de forma mecanizada e pesagem da produção de colmos com transbordo provido de célula de carga.

2.4 Fracionamento do Fósforo no solo

No início do experimento, após a colheita do primeiro (cana planta) e terceiro (segunda soqueira) da cana-de-açúcar foram mensuradas nas frações inorgânicas e orgânicas a dinâmica de P no solo, nas profundidades 0,00 – 0,10 m, 0,10 – 0,20 m e 0,20 – 0,40 m. O fracionamento do P foi realizado em todas as unidades experimentais, seguindo metodologia proposta por Hedley, Stewart e Chauhan (1982), com modificações de Condon, Goh e Newman (1985). Para a sequência do fracionamento de P foi utilizada uma amostra de 0,5 g de solo, submetida a diferentes extratores, em ordem sequencial (relação solo: solução de 1:20), conforme descrito a seguir:

A) Resina de troca aniônica – RTA (P_{RTA}) - extrai P inorgânico lábil prontamente difundindo em solução (2,0 cm² de área);

B) 0,5 mol L⁻¹ NaHCO₃ a pH 8,5 (P_{Bic}) - extrai P inorgânico lábil (P_{iBic}) adsorvido fracamente na superfície de compostos cristalinos e compostos de P (P_{oBic}) orgânicos lábeis com baixa recalitrância como ácido ribonucleico e glicerofosfato (Tiessen; Moir, 1993);

C) 0,1 mol NaOH L⁻¹ ($P_{HID-0,1}$) - remove P inorgânico moderadamente lábil ($P_{iHID-0,1}$) fortemente adsorvido em Fe e Al e minerais argilosos (Hedley *et al.*, 1982), e P orgânico moderadamente lábil ($P_{oHID-0,1}$), principalmente associado aos ácidos fúlvicos e húmicos adsorvidos nas superfícies mineral e matéria orgânica do solo (Linguist *et al.*, 1997);

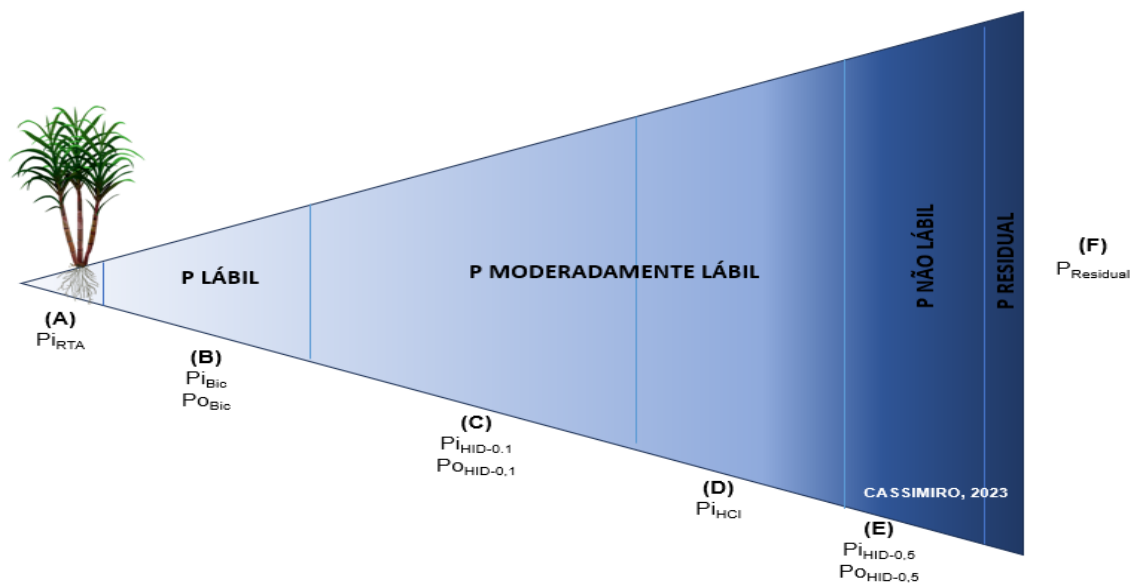
D) 1,0 mol HCl (P_{iHCl}) - extrai P inorgânico moderadamente lábil associado com apatita, outros compostos de Ca-P moderadamente solúveis ou superfícies de óxido carregadas negativamente (Gatiboni *et al.*, 2007);

E) 0,5 mol NaOH L⁻¹ ($P_{HID-0,5}$) - extrai formas mais recalitrantes de P inorgânico ($P_{iHID-0,5}$) associadas a Fe, Al, minerais argilosos e formas não lábeis de P

orgânico ($P_{O_{HID-0,5}}$) associado com ácidos fúlvicos e húmicos dentro de agregados (Condon *et al.*, 1985);

F) P residual ($P_{Residual}$) - obtido depois do solo seco a 50 ° C, moído e digerido com $H_2SO_4 + H_2O_2$ na presença de $MgCl_2$ saturado (Olsen and Sommers 1982). Retira-se uma alíquota dos extratos B, C e E para análise do Pt, visando quantificar o Po de cada fração, sendo este obtido por diferença entre o Pt e o Pi de cada extrato.

Figura 2. Esquema demonstrativo dos compartimentos de P no solo.



Fonte: O autor adaptado (2024)

2.4 Análise estatística

As análises foram realizadas em duas etapas, em ambas, os dados foram testados quanto à normalidade dos erros e homogeneidade de variância e as análises estatísticas foram realizadas por meio do programa (SAS® 2022). Os resultados foram submetidos à ANOVA, constatado significância, as médias dos tratamentos de P foram comparadas entre si pelo teste Tukey ($p < 0,05$) (Pimentel-Gomes, 2009). Os gráficos foram taçados utilizando Sigmaplot® 15.

3. RESULTADOS

Foi possível constatar impactos significativos do uso de fertilizantes fosfatados revestidos na dinâmica do fósforo no solo. A análise de fracionamento de fósforo nas áreas tratadas com fertilizantes fosfatados revestidos revelou um aumento substancial na disponibilidade de fósforo, na camada de 0,00-0,10 m o tratamento com Policote-P_{180kg}, 240kg e MAP-P_{240kg} apresentaram os maiores teores de P lábil, enquanto a testemunha mostrou valores inferiores de P lábil em comparação com os demais, o tratamento Policote-P_{180kg} proporcionou teores de 48,18 mg kg⁻¹ PiBIC, 39,16 mg kg⁻¹ PoBIC e 14,55 mg kg⁻¹PRTA.

A extração de fósforo inorgânico lábil via PiBIC foi mais expressiva no tratamento com Policote_{180kg}, atingindo 63,3 mg kg⁻¹ de P. Em seguida, o tratamento com MAP-P_{240kg} apresentou valores de 60,48 mg kg⁻¹ de PiBIC e 49,60 mg kg⁻¹ de PoBIC.

Foi possível constatar impactos significativos do uso de fertilizantes fosfatados revestidos na dinâmica do fósforo no solo. A análise de fracionamento de fósforo nas áreas tratadas com fertilizantes fosfatados revestidos revelou um aumento substancial na disponibilidade de fósforo, na camada de 0,00-0,10 m o tratamento com MAP-P_{240kg} (98,8 mg kg⁻¹de P) e Policote-P_{180kg} (107,7 mg kg⁻¹de P), apresentaram os maiores teores de P lábil, enquanto a testemunha mostrou valores inferiores de P lábil em comparação com os demais tratamentos, o tratamento Policote-P_{180kg} proporcionou teores de 48,18 mg kg⁻¹ PiBIC, 39,16 mg kg⁻¹ PoBIC e

14,55 mg kg⁻¹PRTA.

As frações de fósforo lábil também apresentaram valores superiores na camada de 0,10-0,20 m no tratamento com MAP-P_{240kg}, atingindo 107,3 mg kg⁻¹ de P. Observou-se que o fósforo inorgânico e orgânico no solo, extraído por resina de troca aniônica (PRTA), foi superior em comparação com os demais tratamentos. A extração de fósforo inorgânico lábil via PiBIC foi mais expressiva no tratamento com Policote_{180kg}, atingindo 63,3 mg kg⁻¹ de P. Em seguida, o tratamento com MAP-P_{240kg} apresentou valores de 60,48 mg kg⁻¹ de PiBIC e 49,60 mg kg⁻¹ de PoBIC.

Na camada de 0,20-0,40 m, o tratamento com MAP-P_{240kg} demonstrou resultados estatisticamente superiores em termos de fósforo extraído, especialmente quando analisado através da resina de troca aniônica (5,99 mg kg⁻¹ de P) e da fração de fósforo orgânico lábil extraído via PoBIC (43,44 mg kg⁻¹). Por outro lado, na extração de fósforo inorgânico lábil via PiBIC, o tratamento com Policote_{180kg} destacou-se significativamente em relação aos demais, apresentando os maiores valores, com 46,17 mg kg⁻¹ de P. Esses resultados indicam o diferencial dos tratamentos na disponibilização de fósforo em diferentes profundidades do solo.

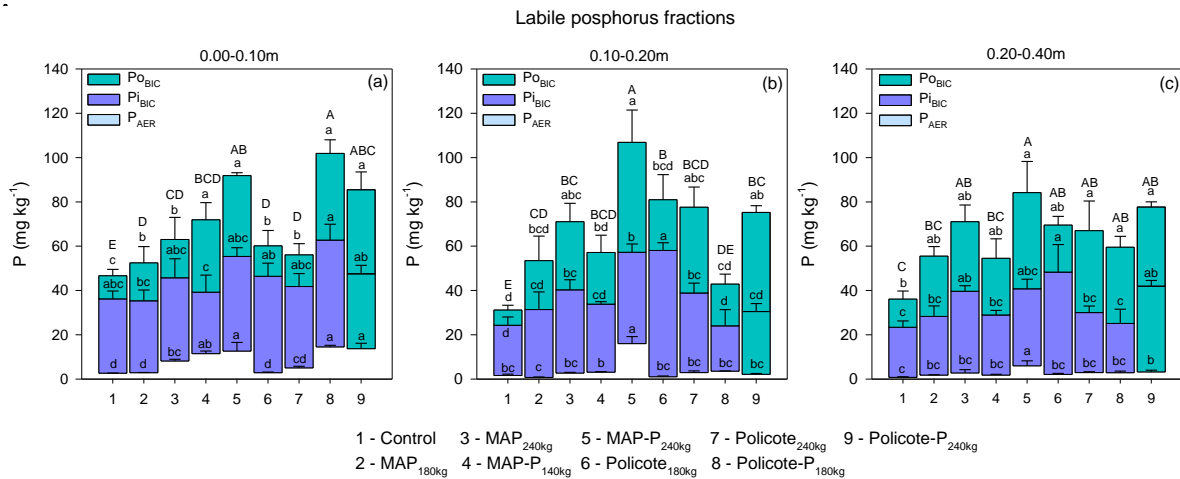


Figura 3. Frações lábeis de P Inorgânico e orgânico no solo extraídas por resina de troca aniônica (PRTA) e por bicarbonato de sódio 0.5 mol L⁻¹ (PiBIC E PoBIC), em função das fontes e doses dos fertilizantes fosfatados cultivado com cana-de-açúcar, Monte Castelo – SP, 2022

Na camada de 0,00-0,10 m, a maior disponibilidade de fósforo moderadamente lábil, extraído via PiHID, foi observada nos tratamentos com MAP-

$P_{140\text{kg}}$ e $\text{Policote}_{180\text{kg}}$, que apresentaram valores de $45,63 \text{ mg kg}^{-1}$ e $43,02 \text{ mg kg}^{-1}$ de P, respectivamente (figura 4 a). Em relação à extração de fósforo via PoHID , os tratamentos que se destacaram e não apresentaram diferenças estatísticas entre si foram o $\text{MAP-P}_{240\text{kg}}$ e o $\text{Policote}_{240\text{kg}}$, com valores superiores de $34,01 \text{ mg kg}^{-1}$ de P e $31,19 \text{ mg kg}^{-1}$ de P, respectivamente. Esses dados evidenciam a eficácia desses tratamentos na disponibilidade de fósforo, contribuindo para uma melhor nutrição na camada superficial do solo. Os teores via PiHCL não foram significativos em todas as profundidades.

Na Figura 4b, na camada de 0,10-0,20 m, os tratamentos com $\text{Policote}_{180\text{kg}}$, extraídos por PiHID , apresentou diferenças estatisticamente significativas em relação aos demais tratamentos, registrando os maiores teores de fósforo, com valores de $46,96 \text{ mg kg}^{-1}$, a extração PoHID foi superior com $\text{MAP-P}_{240\text{kg}}$.

Adicionalmente na camada 0,20-0,40m, os tratamentos com $\text{MAP}_{180\text{kg}}$ ($33,22 \text{ mg kg}^{-1}$) e $\text{Policote}_{180\text{kg}}$ ($34,61 \text{ mg kg}^{-1}$), ambos extraídos via PiHID , não apresentaram diferenças significativas entre si, porém, os valores obtidos foram superiores aos demais tratamentos. Em contraste, a extração por PoHID no tratamento com $\text{MAP}_{180\text{kg}}$ demonstrou uma diferença significativa em relação aos outros, com um valor de $14,34 \text{ mg kg}^{-1}$ de fósforo. De maneira geral, a extração por PiHCL não apresentou significância estatística, conforme ilustrado na Figura 4c.

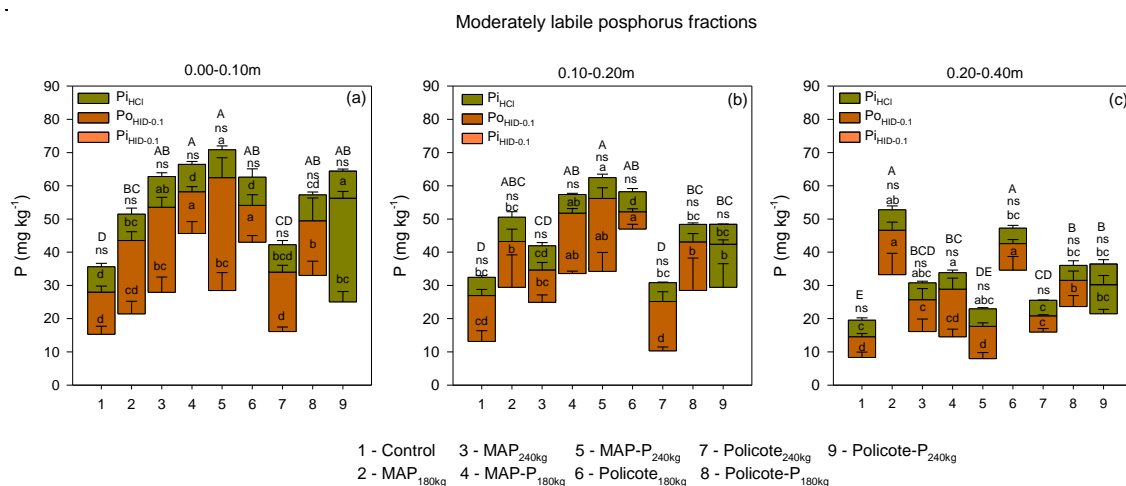


Figura 4. Frações moderadamente lábeis de P Inorgânico e orgânico no solo extraídas por hidróxido de sódio $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ (PiHID-0,1 e PoHID-0,1) e por ácido clorídrico (PHCl), em função das fontes e doses dos fertilizantes fosfatados cultivado com cana de açúcar, Monte Castelo-SP, 2022

Na profundidade de 0,00-0,10 m (Figura 5a), o fósforo residual (P residual) apresentou valores mais elevados em comparação com os métodos de extração PiHID e PoHID. Esses resultados sugerem que uma quantidade considerável de fósforo no solo está presente em formas menos acessíveis para as plantas. Entre os tratamentos, MAP-P_{180kg} e MAP-P_{240kg}, de modo geral, demonstraram teores superiores de fósforo.

Na Figura 5b, referente à profundidade de 0,10-0,20 m, os tratamentos Policote_{180kg} apresentaram teores de 27,81 mg kg⁻¹ de PiHID e 5,32 mg kg⁻¹ de PoHID, enquanto Policote_{240kg} mostrou valores de 32,95 mg kg⁻¹ de PiHID e 3,77 mg kg⁻¹ de PoHID. Esses valores indicam níveis relativamente baixos de fósforo não lábil. Notavelmente, o tratamento com Policote-P_{180kg} destacou-se por apresentar o menor teor de fósforo residual quando comparados ao controle 26,59 mg kg⁻¹ de PiHID e 6,63 mg kg⁻¹ de PoHID

Na profundidade de 0,20-0,40 m, observou-se uma menor disponibilidade de fósforo não lábil no tratamento com Policote_{240kg}, que apresentou valores de 32,29 mg kg⁻¹ de PiHID. Da mesma forma, na extração realizada via PoHID, o tratamento Policote_{240kg} comparado ao controle 34,2 mg kg⁻¹ de PiHID. Em contrapartida, os maiores teores de fósforo foram encontrados nos tratamentos com MAP-P_{180kg}, que apresentou 50,03 mg kg⁻¹ de PiHID, e MAP-P_{240kg}, com 51,43 mg kg⁻¹ de PiHID. O tratamento Policote-P_{180kg}, por sua vez, obteve o maior teor de fósforo extraído por PoHID, com 16,17 mg kg⁻¹. Quanto ao fósforo residual, a variação entre os tratamentos foi menos pronunciada, não apresentando diferenças estatísticas significativas.

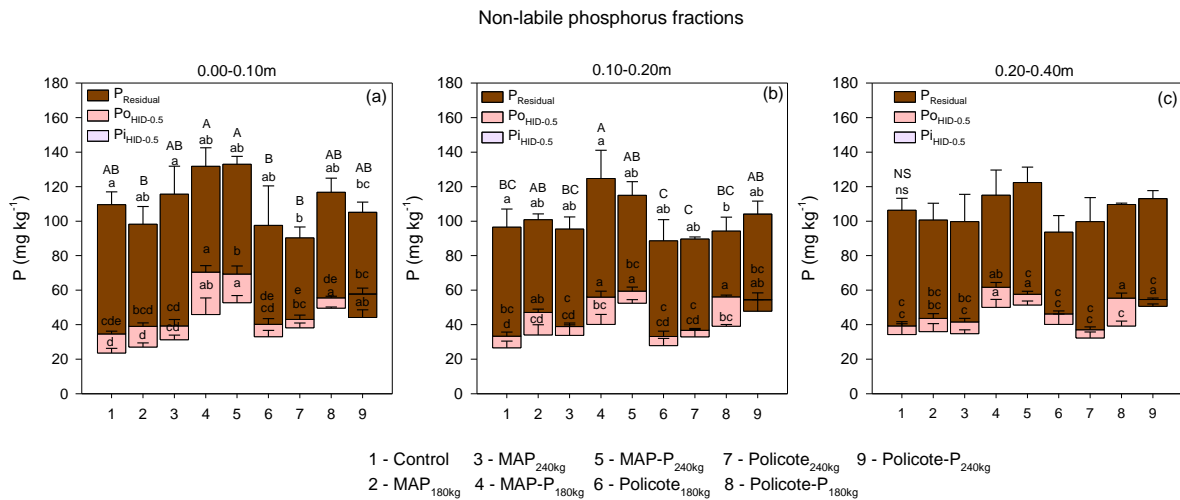


Figura 5. Frações não lábeis de P Inorgânico e orgânico no solo extraídas por hidróxido de sódio 0,5 mol L⁻¹ (PiHID-0,5 e PoHID-0,5) e o residual (Presidual), em função das fontes e doses dos fertilizantes fosfatados cultivado com cana-de-açúcar, Monte Castelo-SP, 2022

As frações lábeis na profundidade de 0,00-0,10 m (representadas pelas cores verde e azul claro) predominam nos tratamentos com Policote, Policote-P e MAP-P, o que indica uma alta disponibilidade de fósforo nessa camada superficial do solo. Essa condição é ideal para a absorção de nutrientes pelas raízes da cana-de-açúcar. Além disso, os tratamentos com Policote e Policote-P demonstram proporções maiores de fósforo moderadamente lábil quando comparados ao controle. Em contraste, as frações não lábeis foram mais elevadas no controle (57,12%) e no tratamento com MAP (48,23%), em comparação com o Policote-P, que apresentou apenas 41,75 % de fósforo não lábil (Figura 6 a).

Referente à profundidade de 0,10-0,20 m na Figura 6 b, observa-se que o tratamento com Policote apresentou uma proporção de fósforo lábil significativamente superior (37,36%) em comparação ao controle, que registrou 19,45%. Além disso, a fração de fósforo moderadamente lábil também foi maior no tratamento com Policote, alcançando 20,40%, em relação ao controle, que apresentou 20,20%. No entanto, a fração de fósforo não lábil mostrou-se predominante no tratamento controle, com uma proporção de 60,20%, enquanto o tratamento com Policote apresentou um valor inferior, correspondendo a 42%.

Na profundidade de 0,20-0,40 m, conforme ilustrado na Figura 6c, observa-se um aumento na proporção de fósforo não lábil em todas as fontes avaliadas, sendo esse incremento mais acentuado no tratamento controle, que apresentou 65,50%, em comparação ao tratamento com Policote, que registrou 48,00%. Em relação ao fósforo moderadamente lábil, o tratamento com MAP destacou-se, alcançando uma proporção de 20,10%, superior ao controle, que apresentou 11,90%. Já o tratamento com Policote na fração lábil, obteve uma proporção de 33,80%, demonstrou-se superior em relação ao controle, que teve um valor de 22,17%.

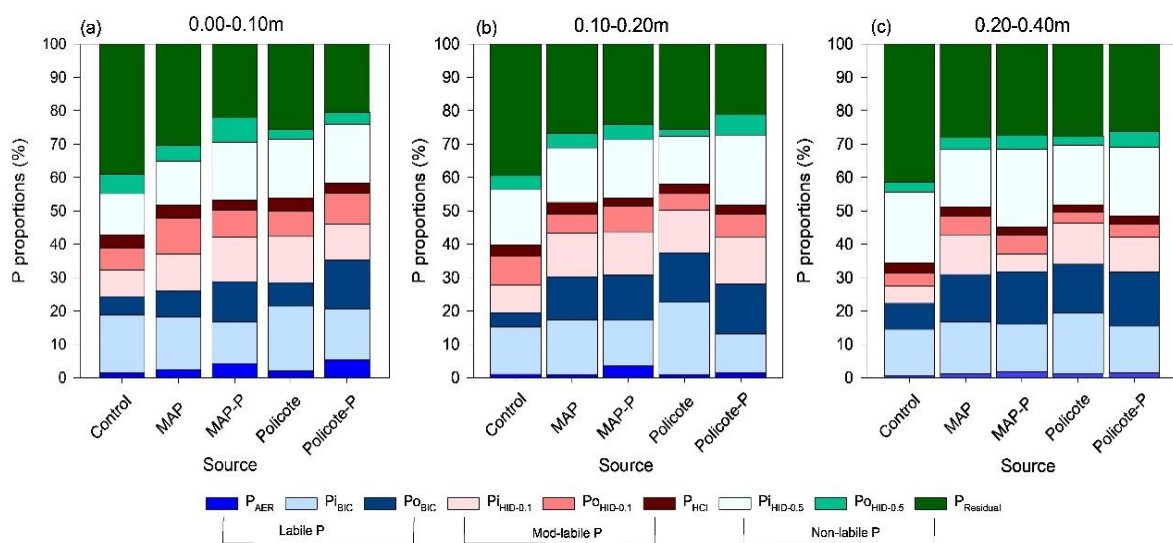


Figura 6. Proporção (%) das diferentes frações de fósforo (P) no solo em diferentes profundidades em função das fontes e doses dos fertilizantes fosfatados cultivado com cana-de-açúcar, Monte Castelo-SP, 2022

4. DISCUSSÃO

A aplicação de fertilizantes fosfatados revestidos mostrou impactos significativos na dinâmica do fósforo no solo, evidenciando melhorias substanciais na disponibilidade deste nutriente essencial em diferentes camadas de profundidade. Os resultados obtidos demonstram a eficácia de diferentes tratamentos, especialmente aqueles envolvendo o uso de Policote em variadas

dosagens, na otimização da disponibilidade de fósforo e na promoção de condições mais favoráveis para o desenvolvimento vegetal.

4.1 Frações Lábeis de P

As frações lábeis de P, extraídas pelos métodos de resina de troca aniônica (PRTA) e bicarbonato de sódio (PiBIC e PoBIC), são consideradas de maior disponibilidade para as plantas devido à sua fácil acessibilidade e rápida mobilização no solo (Hedley *et al.*, 1982). Neste estudo, observou-se que os tratamentos com fertilizantes fosfatados revestidos, particularmente o Policote-P_{180kg}, promoveram aumentos significativos nessas frações, especialmente na camada superficial do solo (0,00-0,10 m).

Especificamente, o tratamento Policote-P_{180kg} apresentou teores de 48,18 mg kg⁻¹ de PiBIC, 39,16 mg kg⁻¹ de PoBIC e 14,55 mg kg⁻¹ de PRTA, superando significativamente a testemunha e outros tratamentos. Este incremento indica que a aplicação de Policote em doses adequadas intensifica a disponibilidade imediata de fósforo, fornecendo suporte nutricional essencial para as fases iniciais de desenvolvimento das plantas. Estes achados estão em concordância com Dobermann, George e Thevs (2002), que destacaram que fertilizantes fosfatados aumentam rapidamente os teores de PiBIC no solo em comparação com fontes naturais.

Na camada de 0,10-0,20 m, o tratamento com MAP-P_{240kg} destacou-se ao atingir 107,3 mg kg⁻¹ de fósforo total, indicando uma efetiva mobilização do nutriente em profundidades maiores. A extração de fósforo inorgânico lábil via PiBIC foi mais expressiva nos tratamentos com Policote_{180kg} (63,3 mg kg⁻¹), demonstrando a capacidade desses fertilizantes em manter níveis elevados de fósforo disponível além da superfície do solo.

Estes resultados sugerem que o uso de fertilizantes fosfatados revestidos contribui para a formação de um reservatório de fósforo facilmente acessível, sustentando o crescimento das plantas ao longo do tempo e minimizando perdas por fixação ou lixiviação. De acordo com Rheinheimer e Anghinoni (2001), a presença de resíduos orgânicos na superfície do solo pode favorecer a transformação de P inorgânico em P orgânico lábil.

4.2 Frações Moderadamente Lábeis de P

As frações moderadamente lábeis de fósforo, extraídas por soluções como NaOH 0,1 mol L⁻¹ (PiHID e PoHID), atuam como importantes tampões no sistema de disponibilidade de fósforo, liberando o nutriente gradualmente conforme a demanda das plantas (Tokura *et al.*, 2011). Neste estudo, na camada de 0,00-0,10 m, os tratamentos com MAP-P_{140kg} e Policote_{180kg} apresentaram os maiores teores de PiHID, com 45,63 mg kg⁻¹ e 43,02 mg kg⁻¹, respectivamente. Em relação ao PoHID, os tratamentos MAP-P_{240kg} (34,01 mg kg⁻¹) e Policote_{240kg} (31,19 mg kg⁻¹) se destacaram, evidenciando a eficácia desses fertilizantes em enriquecer o solo com formas de fósforo que garantem uma nutrição sustentada às plantas.

Na camada de 0,10-0,20 m, o tratamento Policote_{180kg} mostrou superioridade significativa nas extrações por PiHID (46,96 mg kg⁻¹) e PoHID (21,96 mg kg⁻¹), indicando uma excelente capacidade de manter o fósforo disponível em profundidades intermediárias. Esses dados sugerem que o Policote facilita a formação de reservas de fósforo que podem ser mobilizadas conforme necessário, contribuindo para a estabilidade nutricional das plantas e melhorando a eficiência da fertilização fosfatada.

A importância dessas frações é reforçada pelo fato de que elas atuam como fontes secundárias de fósforo, reabastecendo as frações lábeis à medida que são consumidas pelas plantas e micro-organismos do solo (Raij, 1991). Além disso, a presença de fósforo orgânico moderadamente lábil indica uma atividade microbiana saudável e um ciclo biogeoquímico ativo, fatores essenciais para a manutenção da fertilidade do solo a longo prazo (Bünemann *et al.*, 2008).

4.3 Frações Não Lábeis de Fósforo

As frações não lábeis de fósforo representam formas menos acessíveis do nutriente, muitas vezes fortemente adsorvidas aos minerais do solo e de liberação muito lenta (Kozen; Alvarenga, 2010). Na camada superficial (0,00-0,10 m), observou-se que o tratamento controle apresentou a maior proporção de fósforo não lábil (57,12%), seguido pelo tratamento com MAP (48,23%), enquanto o tratamento com Policote-P apresentou apenas 41,75%. Esses resultados indicam que o uso de

fertilizantes fosfatados revestidos reduz a fixação de fósforo em formas indisponíveis, aumentando a eficiência da fertilização e potencializando a disponibilidade do nutriente para as plantas.

Nas camadas mais profundas, como 0,20-0,40 m, houve um aumento mais acentuado no tratamento controle (65,50%) em comparação com o Policote (48,00%). Isso é consistente com a literatura, que aponta que a disponibilidade de fósforo tende a diminuir com a profundidade devido à menor atividade biológica e maior ocorrência de processos de fixação (Rodrigues *et al.*, 2016). No entanto, a menor proporção de fósforo não lábil nos tratamentos com Policote indica uma melhor mobilidade e persistência do nutriente no perfil do solo, mesmo em profundidades maiores.

É importante notar que, apesar da menor disponibilidade imediata, embora as frações de fósforo mais lábeis sejam as primeiras a serem absorvidas pelas plantas, as frações não lábeis também podem se tornar disponíveis através de processos de solubilização e mineralização, especialmente em solos onde a disponibilidade de fósforo é limitada (Gatiboni *et al.*, 2007). Portanto, a redução na formação dessas frações por meio do uso de fertilizantes com polímeros contribui para uma gestão mais eficiente e sustentável do fósforo no solo.

4.4 Distribuição Proporcional das Frações de Fósforo

A análise das proporções das diferentes frações de fósforo proporciona uma compreensão mais ampla da eficiência dos tratamentos aplicados. Na camada de 0,00-0,10 m, os tratamentos com Policote, Policote-P e MAP-P apresentaram predomínio das frações lábeis (cores verde e azul claro), indicando alta disponibilidade de fósforo na zona de maior atividade radicular. Essa condição é ideal para a absorção eficiente de nutrientes e promove um crescimento saudável das plantas. Em contraste, o tratamento controle mostrou maior proporção de fósforo não lábil, refletindo menor disponibilidade do nutriente.

O tratamento com Policote continuou a demonstrar superioridade, com 37,36% de fósforo lábil, significativamente superior ao controle (19,45%). Além disso, a fração de fósforo moderadamente lábil também foi maior no Policote (20,40%) em comparação ao controle (20,20%), indicando uma distribuição mais

equilibrada e favorável do fósforo nas diferentes frações, o que sustenta a nutrição das plantas em diferentes estágios de desenvolvimento.

Na camada mais profunda (0,20-0,40 m), todos os tratamentos apresentaram um aumento na proporção de fósforo não lábil. No entanto, o tratamento com Policote se destacou por manter uma proporção significativamente maior de fósforo lábil (33,80%) em comparação ao controle (22,17%). Esses resultados corroboram os achados de Hofmann *et al.* (2016), que apontam que tratamentos sem adição de fósforo tendem a acumular frações não lábeis, resultando em menor disponibilidade de fósforo para as plantas. Além disso, estudos de Fiorellino *et al.* (2017) demonstram que o Policote, mesmo em camadas mais profundas do solo, promove uma distribuição mais favorável de fósforo, garantindo uma disponibilidade contínua do nutriente.

Esses dados reforçam a eficiência do Policote em promover uma distribuição mais uniforme e acessível de fósforo ao longo do perfil do solo, mesmo em condições em que a disponibilidade do nutriente seria tipicamente limitada. A aplicação de fertilizantes como o Policote, que promove uma distribuição mais equilibrada de fósforo, é crucial para a nutrição das plantas em diferentes estágios de crescimento (Gama-Rodrigues *et al.*, 2014). Por outro lado, sistemas de manejo que não utilizam fertilizantes fosfatados tendem a acumular fósforo em formas menos disponíveis, prejudicando a absorção pelas plantas (Johnson *et al.*, 2019).

4.5 Implicações Agrônomicas e Ambientais

Os resultados obtidos evidenciam que o uso de fertilizantes fosfatados revestidos, como o Policote, oferece vários benefícios agrônomicos significativos. A liberação controlada do fósforo proporcionada por esses fertilizantes aumenta a disponibilidade imediata do nutriente, além de garantir sua presença em formas moderadamente lábeis ao longo do tempo, o que sustenta uma nutrição contínua e equilibrada das plantas (Hoffmann *et al.*, 2012; Fageria *et al.*, 2014). Do ponto de vista econômico, apesar do custo inicial mais elevado dos fertilizantes revestidos, o retorno sobre o investimento é positivo devido ao aumento da produtividade e à redução na frequência de aplicações necessárias (Costa 2012; 2014). A utilização eficiente do fósforo minimiza perdas por fixação ou lixiviação, otimizando o uso dos recursos e contribuindo para a sustentabilidade financeira das atividades agrícolas.

Em termos ambientais, a aplicação de fertilizantes de liberação controlada reduz o risco de contaminação de corpos d'água por fósforo, uma vez que o polímero se alinha com as demandas fisiológicas das plantas, diminuindo o excesso que poderia ser perdido por escoamento superficial (Oliveira, 2019). Essa abordagem contribui para a mitigação de impactos ambientais negativos, como a eutrofização de ecossistemas aquáticos, promovendo práticas agrícolas mais sustentáveis e responsáveis.

5. CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo demonstram de maneira conclusiva que o uso de fertilizantes fosfatados revestidos, como o Policote, tem um impacto positivo significativo na dinâmica do fósforo no solo. Esses fertilizantes não apenas aumentam a disponibilidade imediata de fósforo nas frações lábeis, essenciais para o desenvolvimento inicial das plantas, mas também contribuem para a manutenção de reservas de fósforo em formas moderadamente lábeis, que garantem uma nutrição contínua e sustentável.

A superioridade dos tratamentos com Policote, especialmente em dosagens apropriadas, foi evidente tanto na camada superficial quanto em profundidades maiores, mostrando uma maior eficiência na mobilização e distribuição do fósforo ao longo do perfil do solo. Essa eficiência se traduz em um crescimento vegetativo mais vigoroso e, potencialmente, em maiores rendimentos agrícolas, alinhando-se às necessidades práticas da produção agrícola moderna.

Dessa forma, a aplicação de fertilizantes fosfatados revestidos, como o Policote, emerge como uma estratégia eficaz e sustentável para otimizar a disponibilidade de fósforo no solo, melhorar a produtividade agrícola e mitigar impactos ambientais, oferecendo uma solução robusta para os desafios contemporâneos da agricultura. Esses achados fornecem uma base sólida para futuras recomendações e ajustes no manejo da fertilização fosfatada, visando uma agricultura mais eficiente e sustentável.

REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

BÜNEMANN, E. K.; et al. Phosphorus dynamics: from soil to plant. **Plant and Soil**, v. 1-2, 2008.

CAIONE, G.; FERNANDES, F. M.; LANGE, A. Efeito residual de fontes de fósforo nos atributos químicos do solo, nutrição e produtividade de biomassa da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 8, n. 2, p. 189-196, 2013.

CAIONE, G.; TEIXEIRA, M. T. R.; LANGE, A.; SILVA, A. F. da; FERNANDES, F. M. Modos de aplicação e doses de fósforo em cana-de-açúcar forrageira cultivada em Latossolo Vermelho-Amarelo. **Revista de Ciências Agro-Ambientais**, Alta Floresta, v. 9, n. 1, p. 1-11, 2011.

COSTA, D. B. da. **Adubação fosfatada da cana-de-açúcar: disponibilidade de fósforo e formas de aplicação**. 2012. 83 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2012.

COSTA, D. B. da; ANDRADE, P. K. B. de; SILVA, S. A. M. da; SIMÕES NETO, D. E.; FREIRE, F. J.; OLIVEIRA, E. C. A. de. Adubação fosfatada em cana planta e soca em argissolos do Nordeste de diferentes texturas. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 27, n. 4, p. 47-56, out./dez. 2014.

COSTA, F. O. Impacto econômico da utilização de fertilizantes revestidos. **Revista de Economia Agrícola**, v. 60, n. 3, 2012.

COSTA, F. O. Sustentabilidade financeira na agricultura com uso de tecnologias de liberação controlada. **Journal of Agricultural Economics**, v. 45, n. 2, 2014.

DOBERMANN, A.; GEORGE, T.; THEVS, N. Phosphorus fertilizer effects on soil phosphorus pools in lowland rice. **Soil Science Society of America Journal**, v. 66, n. 1, 2002.

FERREIRA, M. M. R.; BOLONHEZI, A. C.; TEIXEIRA, E. B.; QUEIROZ, C. J. Adubação Fosfatada em Variedades de Cana-de-açúcar Cultivadas em Ambiente Restrito de Cerrado. **Cultura Agronômica**, Ilha Solteira, v. 25, n. 3, p. 223-240, 2016.

FIORELLINO, N.; KRATOCHVIL, R.; COALE, F. Long-term agronomic drawdown of soil phosphorus in Mid-Atlantic coastal plain soils. **Agronomy Journal**, v. 109, n. 2, p. 711-721, 2017.

GAMA-RODRIGUES, A. C.; SALES, M. V. S.; SILVA, P. S. D.; COMERFORD, N. B.; CROPPER, W. P.; GAMA-RODRIGUES, E. F. An exploratory analysis of phosphorus transformations in tropical soils using structural equation modeling. **Biogeochemistry**, v. 118, n. 1-3, p. 453-469, 2014.

GATIBONI, L. C.; et al. Dinâmica do fósforo no solo em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 4, 2007.

HEDLEY, M. J.; STEWART, J. W. B.; CHAUHAN, B. S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. **Soil Science Society of America Journal**, v. 46, n. 5, 1982.

HOFMANN, K.; HEUCK, C.; SPOHN, M. Phosphorus resorption by young beech trees and soil phosphatase activity as dependent on phosphorus availability. **Oecologia**, v. 181, n. 2, p. 369-379, 2016.

JOHNSON, A. H.; FRIZANO, J.; VANN, D. R. Biogeochemical implications of labile phosphorus in forest soils determined by the Hedley fractionation procedure. **Oecologia**, v. 127, n. 3, p. 277-284, 2019.

JUNIOR, A. S.; SILVA, C. A. Avaliação do uso de fertilizantes fosfatados revestidos com polímeros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 3, p. 849-857, jun. 2012.

KOZEN, T. N.; ALVARENGA, R. C. Disponibilidade de fósforo no solo e produtividade de culturas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 3, 2010.

OLIVEIRA, A. L. Gestão sustentável da fertilização fosfatada na agricultura. **Cadernos de Agroecologia**, v. 14, n. 2, 2019.

OLIVEIRA, C. L. B. **Adubação fosfatada com polímeros em soqueira de cana-de-açúcar: efeito da labilidade de fósforo no solo e na produtividade**. 2019. 85 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Animal) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas, Dracena, 2019.

RAIJ, B. VAN. **Fertilidade do solo e adubação**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1991.

RAIJ, B. VAN; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 1997. 285 p.

RHEINHEIMER, D. dos S.; ANGHINONI, I. Fósforo orgânico no solo e sua disponibilidade para as plantas. **Ciência Rural**, v. 31, n. 4, 2001.

RODRIGUES, M.; et al. Capacidade de adsorção de fósforo em solos ácidos. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 39, n. 2, 2016.

ROLIM NETO, F. C.; NATALE, W.; PRADO, R. M. DO; MELO, W. J. DE; CORRÊA, M. C. M.; PRADO, F. A. DO. Dinâmica do fósforo no solo em função do fósforo remanescente e da calagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 5, p. 451-457, maio 2004.

ROSSETTO, R.; DIAS, F. L. F.; VITTI, A. C. Fertilidade do solo, nutrição e adubação. *In*: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M. de; LANDELL, M. G. de A. (Ed.). **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2008. p. 221-237.

SANTOS, H. G. DOS; ANJOS, L. H. C. DOS; JACOMINE, P. K. T.; OLIVEIRA, V. Á. DE; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. DE; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. DE. Atualização metodológica para classificação de solos brasileiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 40, e0150198, 2016.

SANTOS, H. G. DOS; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. DOS; OLIVEIRA, V. Á. DE; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. DE; OLIVEIRA, J. B. DE; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p.

SOIL SURVEY DIVISION STAFF. **Soil survey manual**. Washington, DC: United States Department of Agriculture, Soil Conservation Service, 2014. 503 p.

SOUSA, R. T. X. de; KORNDÖRFER, G. H. Efeito da aplicação de fertilizantes fosfatados na produtividade e variáveis tecnológicas da cana-de-açúcar. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 7, n. 12, p. 1-10, 2011.

TOKURA, A. M.; et al. Frações de fósforo no solo influenciadas por fontes e doses do nutriente. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 2, 2011.

ZAMBROSI, F. C. B. Adubação com fósforo em cana-soca e sua interação com magnésio. **Bragantia**, Campinas, v. 71, n. 3, p. 400-405, out. 2012.