

CARLOS HENRIQUE FORNASARI

DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO AVALIADA POR DISTINTOS  
EXTRATORES EM FUNÇÃO DA CALAGEM EM SOLOS DO  
PARAGUAI

CASCVEL  
PARANÁ - BRASIL  
FEVEREIRO - 2024

CARLOS HENRIQUE FORNASARI

DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO AVALIADA POR DISTINTOS  
EXTRATORES EM FUNÇÃO DA CALAGEM EM SOLOS DO  
PARAGUAI

Tese apresentada à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, para obtenção do título de Doutor.

Orientador: Dr. Luiz Antônio Zanão Júnior

Coorientador: Dr. Felipe Martins Damaceno

CASCVEL  
PARANÁ - BRASIL  
FEVEREIRO - 2024



Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

Fornasari, Carlos Henrique  
DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO AVALIADA POR DISTINTOS  
EXTRATORES EM FUNÇÃO DA CALAGEM EM SOLOS DO PARAGUAI /  
Carlos Henrique Fornasari; orientador Luiz Antônio Zanão  
Júnior; coorientador Felipe Martins Damaceno. -- Cascavel,  
2024.  
59 p.

Tese (Doutorado Campus de Cascavel) -- Universidade  
Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Ciências Exatas e  
Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Energia na  
Agricultura, 2024.

1. . I. Zanão Júnior, Luiz Antônio , orient. II. Damaceno,  
Felipe Martins, coorient. III. Título.

**CARLOS HENRIQUE FORNASARI**

Disponibilidade de fósforo avaliada por distintos extratores  
em função da calagem em solos do Paraguai

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia, linha de pesquisa: Biomassa e culturas energéticas, APROVADO pela seguinte banca examinadora:



Orientador - Luiz Antônio Zanão Júnior  
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** AFFONSO CELSO GONÇALVES JUNIOR  
Data: 26/02/2024 09:20:03-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Affonso Celso Gonçalves Junior  
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Douglas Bassegio  
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



André Vinicius Zabini  
Agrônomo S.A

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** WESLEY ESDRAS SANTIAGO  
Data: 23/02/2024 15:59:04-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Wesley Esdras Santiago  
Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM)

Cascavel, 23 de fevereiro de 2024

*“Muitos são os planos no coração do homem, mas o que prevalece é o propósito do Senhor”*

*Provérbios 19:21*

## **AGRADECIMENTOS-**

Primeiramente, à Deus que no princípio criou os céus e a terra e me permitiu concluir este objetivo.

A minha esposa Aline F. N. Fornasari por todo amor e compreensão, ao meu filho Samuel N. Fornasari, herança do Senhor que me faz um ser humano melhor cada dia.

Ao meu Pai Sidnei M. Fornasari por todo auxílio em trâmites de protocolos junto à universidade.

Ao professor Doutor Luiz Antônio Zanão Júnior pela orientação no desenvolvimento do trabalho com muito discernimento e sabedoria.

Ao professor Doutor Felipe Martins Damaceno, pelas correções e sugestões nos trabalhos desenvolvidos.

A toda equipe do PPGA da Unioeste, principalmente a colaboradora Vanderleia Schmidt pela ajuda.

A empresa Agronómico S.A com sede no Paraguai e ao seu Diretor Dr. André V. Zabini por disponibilizar toda a estrutura do campo experimental e laboratórios para realizações de todas as análises e sua equipe de campo, Jaime e Diego.

A toda equipe do laboratório que ajudou nos ensaios: Bruna Alejandra Gomez Britez, Ignacia Angelica Gonzalez Escobar, Mariela Beatriz Delvalle Bareiro, Yenifer Flach Leiria, Alexis Gabriel Balmori Alvarez, Angel Luis Olmedo Caceres, Maricel Herrera Velázquez, Vanessa Tonet Gimenez, Tainara Das Chagas De Souza e Karen Eloiza Aliente Cacéres.

Ao Douglas Bassegio pelo auxílio no desenvolvimento do trabalho.

Ao Eduardo Guimarães que sempre me incentivou para iniciar o Doutorado.

FORNASARI, Carlos Henrique. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Fevereiro 2024. **Disponibilidade de fósforo avaliada por distintos extratores em função da calagem em solos do Paraguai.** Orientador: Dr. Luiz Antônio Zanão Júnior; Coorientador: Dr. Felipe Martins Damaceno.

## RESUMO

No Paraguai são escassos estudos para avaliação da disponibilidade de fósforo no solo, utilizando outros extratores além do duplo ácido Mehlich-1 (M-1). Surge, porém, a dúvida quanto a possibilidade de se utilizar resultados de trabalhos de calibração realizados em outros locais do mundo. Destaca-se que tanto o extrator Mehlich-3 (M-3) quanto a resina trocadora de ânions (RTA) ainda não foram avaliadas como possíveis métodos de rotina para a determinação de P em solos representativos do país. Assim, os objetivos do trabalho foram avaliar a disponibilidade do fósforo em diferentes solos do Paraguai pelos extratores M-1, M-3 e RTA e a sensibilidade desses extratores à calagem e ainda, calcular os níveis críticos de P obtidos para esses extratores. O experimento foi conduzido no período de maio a setembro de 2023, em casa de vegetação, em Hernandarias, no Paraguai. Foram utilizados vasos plásticos com furos de drenagem e capacidade para  $3,0 \text{ dm}^{-3}$ , preenchidos com amostras dos solos (Argissolo, Gleissolo, Latossolo, Nitossolo e Planossolo). Para cada tipo de solo os tratamentos foram gerados pela combinação de um fatorial  $4 \times 2$ , sendo quatro doses de fósforo (0, 50, 150 e  $300 \text{ mg kg}^{-1}$  de P) e duas condições de acidez do solo (com calagem e sem calagem). Foi utilizado o delineamento experimental inteiramente casualizado, com quatro repetições. O milho (*Zea mays* L.) foi utilizado como espécie vegetal de referência, sendo quatro plantas por vaso, cultivadas por 45 dias. Ao término do experimento foram determinados a produção de matéria seca, o teor e o acúmulo de fósforo na parte aérea das plantas e os teores de P disponível no solo avaliados pelos extratores M-1, M-3 e RTA. Foram ajustadas equações de regressão para os efeitos das doses de P e correlação entre variáveis. Além disso, foram determinados os níveis críticos de P para cada tipo de solo estudado. As soluções extratoras M-1, M-3 e RTA mostraram-se eficazes na estimativa da disponibilidade de fósforo em solos do Paraguai, com altos coeficientes de correlação entre o fósforo extraído e o seu conteúdo parte aérea das plantas de milho. A calagem influenciou a recuperação do fósforo em doses de  $300 \text{ mg kg}^{-1}$ , sendo observada para M-3 em Latossolo e Planossolo, M-1 em Gleissolo e Planossolo, e RTA em Gleissolo, Latossolo e Planossolo. No entanto, não houve efeito da calagem para M-3 em Gleissolo, Argissolo e Nitossolo, M-1 em Latossolo, Argissolo e Nitossolo, e RTA em Argissolo e Nitossolo. Os níveis críticos de fósforo, ordenados quantitativamente para os cinco solos, seguiram a sequência: M-3 > RTA > M-1.

**PALAVRAS-CHAVE:** análise de solos; pH; nível crítico.

FORNASARI, Carlos Henrique. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, February 2024. **Phosphorus availability assessed by distinct extractors as a function of liming in Paraguay soils.** Adviser: Dr. Luiz Antonio Zanão Júnior. Co-adviser: Dr. Felipe Martins Damaceno.

### ABSTRACT

In Paraguay, there are few studies to evaluate the availability of phosphorus in the soil, using extractants other than the double acid Mehlich-1 (M-1). However, doubt arises regarding the possibility of using results from calibration work carried out in other locations around the world. It is noteworthy that both the Mehlich-3 extractor (M-3) and the anion exchange resin (RTA) have not yet been evaluated as possible routine methods for determining P in soils representative of the country. Thus, the objectives of the work were to evaluate the availability of phosphorus in different soils in Paraguay by extractors M-1, M-3 and RTA and the sensitivity of these extractors to liming and also calculate the critical levels of P obtained for these extractors. The experiment was conducted from May to September 2023, in a greenhouse, in Hernandarias, Paraguay. Plastic pots with drainage holes and a capacity of  $3.0 \text{ dm}^{-3}$  were used, filled with soil samples (Lixisol, Gleysol, Oxisol, Nitisol and Planosol). For each type of soil, treatments were generated by combining a 4x2 factorial, with four doses of phosphorus (0, 50, 150 and  $300 \text{ mg kg}^{-1}$  of P) and two soil acidity conditions (with liming and without liming). A completely randomized experimental design was used, with four replications. Corn (*Zea mays* L.) was used as a reference plant species, with four plants per pot, cultivated for 45 days. At the end of the experiment, the production of dry matter, the content and accumulation of phosphorus in the aerial part of the plants and the levels of available P in the soil were determined, evaluated by extractors M-1, M-3 and RTA. Regression equations were adjusted for the effects of P doses and correlation between variables. Furthermore, critical P levels were determined for each type of soil studied. The extraction solutions M-1, M-3 and RTA proved to be effective in estimating phosphorus availability in soils in Paraguay, with high correlation coefficients between the extracted phosphorus and its content in the aerial part of corn plants. Liming influenced phosphorus recovery at doses of  $300 \text{ mg kg}^{-1}$ , being observed for M-3 in Oxisol and Planosol, M-1 in Gleysol and Planosol, and RTA in Gleysol, Oxisol and Planosol. However, there was no effect of liming for M-3 in Gleysol, Lixisol and Nitisol, M-1 in Oxisol, Lixisol and Nitisol, and RTA in Lixisol and Nitisol. The critical phosphorus levels, ordered quantitatively for the five soils, followed the sequence: M-3 > RTA > M-1.

**KEYWORDS:** soil analysis; pH; critical level.

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>4</b>
<b>2.1 Disponibilidade do fósforo no solo e a dependência da adubação fosfatada nos sistemas de produção agrícolas.....</b>	<b>4</b>
<b>2.2 Relações entre minerais de argila e o fósforo no solo .....</b>	<b>5</b>
<b>2.3 Soluções extratoras para quantificação de “fósforo disponível” em solos ..</b>	<b>6</b>
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>12</b>
<b>3.1 Localização do experimento .....</b>	<b>12</b>
<b>3.2 Condução do experimento .....</b>	<b>12</b>
<b>3.3 Métodos analíticos e procedimentos.....</b>	<b>13</b>
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>17</b>
<b>4.1 Teores de fósforo pelos extratores Mehlich-1 (M-1), Mehlich-3 (M-3) e resina trocadora de ânions (RTA) .....</b>	<b>17</b>
<b>4.2 Fósforo recuperado pelas plantas .....</b>	<b>32</b>
<b>4.3 Correlações entre os teores de P disponível por cada extrator e o conteúdo de P na parte aérea das plantas de milho.....</b>	<b>40</b>
<b>4.4 Correlações entre os teores de P disponível por cada extrator e o conteúdo acumulado de P nas plantas de milho.....</b>	<b>43</b>
<b>4.5 Produção de matéria seca em função de doses de P na ausência e presença de calcário.....</b>	<b>44</b>
<b>4.6 Níveis críticos de P no solo.....</b>	<b>49</b>
<b>5. CONCLUSÕES .....</b>	<b>51</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>52</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Fósforo (P) é um elemento essencial para a produção de alimentos e biocombustíveis (JARVIE et al., 2015). No ano-safra de 2021 a demanda por este macronutriente aumentou em 7% (1º de julho de 2020 a 30 de junho de 2021) em comparação com o ano-safra de 2020, sendo a Ásia e a América do Sul responsáveis por este aumento (U.S. Geological Survey, 2002).

Portanto, é importante buscar estratégias para que os sistemas agrícolas no Paraguai façam o uso racional deste insumo. Experimentos de longa duração, em campo, mostraram que grande parte (> 70 %) do P excedente adicionado aos solos brasileiros por fertilizantes permanece no solo, principalmente em formas não disponíveis para as culturas (RODRIGUES et al., 2016; ROY et al., 2016).

Por outro lado, existe a preocupação do setor agrícola com a estimativa de que em 2050 haverá cerca de 9,1 bilhões de habitantes no mundo. Isso representa aumento na demanda por alimentos e o déficit de fertilizantes fosfatados limita a produtividade e restringe a vida dos ecossistemas aquáticos (FINK et al., 2016).

Os primeiros trabalhos que surgiram no Paraguai de calibrações, visando recomendações de fertilização para culturas de grãos sob sistema de plantio direto, foram realizados através de Cubilla (2005), preconizando a amostragem na camada de 0-10 cm. Porém, de 2005 até os dias atuais foram 18 anos de estudos e trabalhos e os principais manuais de adubação e calagem na literatura atual preconizam amostragem na camada de 0-20 cm para as devidas interpretações das análises de solos, a exemplo o do Paraná (SBCS/NEPAR, 2017). No Paraguai, são escassos trabalhos para avaliação da disponibilidade de fósforo na camada de 0-20 cm, utilizando outros extratores além do extrator duplo ácido Mehlich-1.

Após quase duas décadas do primeiro trabalho, surgiram vários laboratórios que padronizaram para o Paraguai os mesmos métodos para avaliação da fertilidade de solos utilizados no estado brasileiro Paraná. Empresas de consultoria agrícola, também pela escassez na literatura paraguaia, seguem manuais da região Sul do Brasil para interpretação e recomendação de adubação e calagem para as culturas.

Alcançando o posto de sexto produtor mundial de soja na safra 2019/2020, o Paraguai produziu 10,250 milhões de toneladas da oleaginosa em 3,6 milhões de hectares (PARAGUAYN, 2021). Assim, a produtividade ficou abaixo daquela obtida

pela região oeste do estado brasileiro Paraná que na safra de 2019/2020 ficou em torno de 3792 kg ha<sup>-1</sup> (MOREIRA, 2020). Um dos motivos dessa diferença pode estar associado à acidez ativa dos solos da região oriental do Paraguai. Em análise de 10.512 amostras analisadas na camada 0-20 cm por um laboratório privado localizado no município de Minga-Guazú (dados não publicados) verificou-se que em 54,6 % das áreas amostradas necessitavam de calagem para elevar o pH dos solos. Outro motivo pode ser os baixos teores de P disponível. De um total de 8.282 amostras avaliadas pelo mesmo laboratório, 42 % estavam com níveis de fósforo abaixo do nível crítico, conforme Alvarez et al. (2000).

Os solos brasileiros apresentam baixos teores de P disponível, portanto, requerem adubação orgânica ou inorgânica (MISSONG et al., 2018). No Paraguai se observa a mesma tendência para áreas sem exploração agrícola, ou seja, teores disponíveis de P avaliados com extrator Mehlich-1 na faixa de 2 a 4 mg dm<sup>-3</sup>. (Dados internos não publicados). O fósforo da solução do solo é absorvido pelas plantas na forma de ânion ortofosfato (HPO<sub>4</sub><sup>2-</sup> e H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup>) e a atividade dos ânions variam no solo de acordo com o valor do pH (OJEKANMI et al., 2011), ou seja, as cargas superficiais de partículas do solo com o aumento de pH se tornam de forma gradativa mais negativas ocasionando menor adsorção e diminuindo o potencial eletrostático do plano de adsorção, aumentando a repulsão entre fosfato e superfície adsorvente (BARROW, 1985; HAYNES, 1984). Por outro lado, a adsorção de P pelo solo aumenta em baixos valores de pH (ZOZ et al., 2009).

Teores reduzidos de P disponível no solo são explicados pelas reações de sorção que ocorrem de maneira natural em função da interação de íons em solução com a fase sólida do solo (óxidos, hidróxidos, argilominerais, carbonatos e matéria orgânica) (DAMON et al., 2014).

Em solos tropicais, altamente intemperizados, os minerais primários contendo P, como a hidroxiapatita, estão esgotados há muito tempo devido à acidificação (VITOUSEK et al. 2010; YANG ET AL., 2013). Muito do P presente provavelmente está associado a argilas e óxidos e minerais relacionados de Fe e Al, ou ocorre em formas orgânicas refratárias (CROSS; SCHLESINGER, 1995; YANG; POST, 2011).

De toda a constituição da fração argila, os óxidos de Fe e Al são os mais ativos na adsorção de P. Dentre os óxidos, a goethita é o componente de maior capacidade

de adsorção de P no solo, pois contém a maior área superficial, isto é,  $23 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$  de superfície específica, em média (BORTOLUZZI et al., 2015).

Mesmo após algumas horas da aplicação do P em solos ácidos, o elemento tende a ser adsorvido pela superfície das argilas e dos óxidos de Fe e Al, formando compostos de menor solubilidade. Além disso, como consequência da mineralogia e do pH desses solos, o P pode precipitar-se com ferro (Fe), alumínio (Al) e manganês (Mn) (NOVAIS; SMYTH, 1999). É evidente a complexidade da dinâmica do fósforo no solo e a falta de concordância entre a forma de avaliar a disponibilidade desse elemento para fins agronômicos, mesmo com vários tipos de extratores disponíveis e com eficiência preconizada na literatura, tais como Mehlich-1 (M-1), Mehlich-3 (M-3) e resina de troca aniônica (RTA).

Surge, porém, a dúvida quanto à possibilidade de se utilizar resultados de trabalhos de calibrações realizados em outros locais do mundo, destacando que tanto o extrator M-3 quanto a RTA ainda não foram avaliadas como possíveis métodos de rotina para a determinação de P em solos do Paraguai. Assim, os objetivos do trabalho foram: a) avaliar a eficiência dos extratores M-1, M-3 e RTA na recuperação de fósforo em diferentes solos do Paraguai; b) estudar o efeito da calagem na recuperação de fósforo pelos solos utilizando os extratores M-1, M-3 e RTA e c) avaliar a produção de biomassa de milho em relação as doses de fósforo e calcular os níveis críticos de P obtidos pelos extratores M-1, M-3 e RTA em solos do Paraguai para obtenção de 90 % da produção máxima estimada.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Disponibilidade do fósforo no solo e a dependência da adubação fosfatada nos sistemas de produção agrícolas

Grupos hidroxilas na superfície dos óxidos de ferro, concentração, cristalinidade e área de superfície específica são as variáveis que estão relacionadas se o P pode ser adsorvido ou dessorvido no solo (FINK et al., 2016).

A disponibilidade do fósforo na solução do solo se dá por três fatores: fator intensidade (I), fator quantidade (Q) e fator capacidade ou poder tampão de P (FCP). À medida que o fósforo é absorvido pela planta o suprimento de I que está em solução, é mantido pelo fator Q, quantitativamente maior que o I. Há, portanto, um equilíbrio entre o fator I e Q. Esta interdependência caracteriza o fator capacidade de P ou poder tampão de P, quantitativamente definido pela relação Q/I (NOVAIS; SMYTH, 1999).

Quando nos referimos ao teor de P total no solo podemos chegar a amplitudes de 100 a 3000 mg kg<sup>-1</sup> (BRADY; WEIL, 2016). Em solos agrícolas quando nos referimos a solução do solo os valores de P estão na faixa entre 0,002 e 2 mg L<sup>-1</sup> (FARDEAU, 1995). Estima-se que apenas 5 % a 25 % do fósforo solúvel adicionado ao solo, como adubo, sejam aproveitados pela cultura (FALCÃO; SILVA, 2004).

A dependência da adubação fosfatada na agricultura nas últimas cinco décadas tem sido alarmante, de quase zero em 1960 para 2,2 Tg ano<sup>-1</sup> de P em 2016 (WITHERS et al., 2018). Estima-se o aumento no Brasil de 3 a 5 % ao ano durante a próxima década em relação a utilização de fertilizantes minerais fosfatados e aumento médio de aproximadamente 3,6 % na América Latina, de acordo com as previsões da FAO (2015).

Com a introdução da prática conservacionista do plantio direto, que representa mais de 30 milhões de hectares (KASSAM et al., 2019), os agricultores brasileiros reduziram as perdas de solo e nutrientes por erosão e escoamento, e houve um aumento do rendimento das culturas, conforme Franchini et al. (2012). Por outro lado, a eficiência de uso de P ainda é caracterizada como muito abaixo do esperado. Na última década, a eficiência de uso de P por algumas culturas foi em média de 50 %. Os baixos valores da eficiência de uso de P estão associados à elevada capacidade de fixação de P dos solos brasileiros de forma quase irreversível nas superfícies dos

oxihidróxidos de Fe/Al que compõem a fração argila desses solos (RODRIGUES et al., 2016; ROY et al., 2016; WITHERS et al., 2018).

O manejo com plantas de cobertura, rotações de culturas de forma adequada, consórcios de cultivo, plantio direto e pH do solo corrigido constantemente através da técnica da calagem faz aumentar a eficiência do uso de P em até 80 % em solos tropicais (ANTONIADIS et al., 2015; WITHERS et al., 2018).

Nolla et al. (2020) correlacionaram correção da acidez do solo através da calagem e disponibilização de fósforo em um Latossolo Vermelho distrófico típico. Observaram um acréscimo nos níveis de P de  $13 \text{ mg dm}^{-3}$  na testemunha para cerca de  $20 \text{ mg dm}^{-3}$  com a aplicação de calcário (dose para elevar a saturação de bases para 60 %). Maiores valores de pH promovem menor capacidade de adsorção de fosfatos, gerando maior eficiência na disponibilização de P.

## **2.2 Relações entre minerais de argila e o fósforo no solo**

O fertilizante fosfatado é tipicamente aplicado como formas inorgânicas solúveis, que dentro do perfil do solo podem ser rapidamente imobilizadas por sorção em superfícies de minerais de argila do solo (gibbsita, hematita, goethita) (SHEN et al., 2011) ou precipitado com Ca, Fe ou Al (NOVAIS; SMYTH, 1999). Desta forma, os solos imobilizam este P altamente lábil e convertem-no em formas P estáveis fortemente sorvidas, moderadamente e não lábeis (NEGASSA; LEINWEBER, 2009), dependendo da mineralogia intrínseca do solo. Estudos usando esquemas de fracionamento sequencial de fósforo (P inorgânico, P orgânico e P total) e análise espectroscópica concluíram que o P foi acumulado predominantemente como P lábil e moderadamente lábil em solos temperados, e como P moderadamente lábil e não lábil em solos tropicais (RODRIGUES et al., 2016).

De acordo com a literatura a maior adsorção de P deu-se na presença de goethita quando comparada a hematita (BIGHAM et al., 1978; CAMARGO et al., 2015; FONTES; WEED, 1996; KARIM; ADAMS, 1984; ROLIM NETO et al., 2004).

O acréscimo do caráter caulínítico dos solos implica a redução da capacidade de adsorção de P em diversos Latossolos do Brasil (KER, 1995) entendendo-se que a função da caulinita provavelmente seja secundária em comparação com os constituintes oxídicos. Latossolos caulíníticos predominam no Sul do Brasil.

Os solos de origem basáltica apresentam maior potencial de adsorção de P, quando comparados aos solos formados de sedimentos de granito e arenito (GONÇALVES et al., 2011; VALLADARES et al., 2003). Os mesmos autores afirmaram que o potencial dos solos em adsorver P é definido pelo teor e tipo de material predominante e por fim atributos cristalográficos dos minerais.

A adsorção de P, o teor total do elemento e as formas ligadas mais fortemente a Al e Fe ocorre à medida que a mineralogia dos Latossolos se torna mais oxidada. Em área com cultivo, a adsorção de P aumenta as formas de P ligados a Ca em Latossolos (MOTTA et al., 2002).

Poucos são os trabalhos que correlacionam os minerais pedogênicos e sua influência nos atributos químicos e físicos do solo. Entretanto BARBIERI et al. (2009, 2013) e CAMARGO et al. (2008 e 2015), criaram de zonas de manejo de ocorrência de Hematita, Goethita e variáveis covariativas, como o teor de P.

No panorama internacional, com base na análise bibliométrica da plataforma SCOPUS, é possível destacar o aumento quantitativo de publicações com a temática fósforo e mineralogia. Em 1994 foram publicados 10 artigos por ano, aproximadamente. Atualmente o número de artigos chega a 50 por ano.

A matéria orgânica também assume um destaque relevante no processo de retenção de P (ANDRADE et al., 2003; ANTELO et al., 2007), pois os ácidos húmicos atuam na inibição do crescimento dos cristais de óxidos de ferro, aumentando a área de superfície específica e, conseqüentemente, favorecendo a retenção de P pelos óxidos (BARRON et al., 1988). Por outro lado (FINK et al., 2016) relataram o efeito ambivalente da matéria orgânica atuando em diversas formas na retenção de fosfato, seja alterando a forma cristalina dos minerais, seja retardando o contato direto de P na superfície dos óxidos, isto é, reduzindo a força de retenção (ANTELO et al., 2007).

### **2.3 Soluções extratoras para quantificação de “fósforo disponível” em solos**

Como instrumento que atua na transferência de informações geradas pela pesquisa sobre adubação de culturas aos produtores, se destaca como principal ferramenta a análise do solo.

A recomendação das quantidades de fertilizantes depende, em sua maioria, da qualidade da diagnose do nível de disponibilidade de um elemento em específico no

solo, proporcionada pela técnica analítica utilizada na análise química para fins de avaliação da fertilidade.

A situação se torna complexa no caso da determinação do P, pois existe uma grande variedade de métodos de extração do elemento em uso. Essa variedade é um indicativo da complexidade diante da dinâmica do P no solo (LARSEN, 1967), assim como da falta de concordância sobre qual seria o método mais adequado (FIXEN; GROVE, 1990).

Desde o século XIX, a pesquisa mostrou que o teor total de P em solos não se aplicava como indicador da disponibilidade do elemento para as plantas e iniciou-se busca por extratores que melhor simulassem a ação das raízes das plantas, como foi o caso do ácido cítrico a 1 % (DYER, 1894).

Com o passar do tempo, os procedimentos evoluíram em relação a extração de P do solo e, conseqüentemente, houve um avanço nos conceitos sobre a sua disponibilidade. De forma considerável a evolução da conceituação dos fatores intensidade, quantidade, capacidade e difusão, orientou estudos sobre a disponibilidade de P em solos avaliada por diferentes métodos de extração, conforme (WILD, 1964; GUNARY; SUTTON, 1967; LARSEN, 1967).

Pesquisas sobre a disponibilidade de P no solo usando o radioisótopo  $P^{32}$ , permitiram determinar o chamado “P isotopicamente trocável” (LARSEN, 1952; MCAULIFFE et al., 1948), também chamado de “fosfato lábil”, ou P-Lábil, uma das mais importantes avaliações do “fator quantidade”, inúmeras vezes tomada como referência em trabalhos de pesquisa.

As plantas exigem aporte constante de P na solução do solo (Fator Intensidade), oriundo do P lábil, representado pelo “fator quantidade” (Q) (GUNARY; SUTTON, 1967). O “fator capacidade”, preconizado pela razão de equilíbrio entre a quantidade de P (Q) e o P em solução (I), é chamada como “poder-tampão” de fosfato que é uma medida da capacidade do solo em manter um nível determinado de P na solução (BECKETT; WHITE, 1964), levando em consideração o fato de as plantas absorverem apenas o P que se encontra na solução do solo (WILD, 1964). Em um estudo sobre a influência dos fatores quantidade, intensidade, capacidade e também difusão, Dalal e Hallsworth (1976), trabalhando com absorção de P pelo trigo, concluíram que a combinação do fator quantidade e o fator capacidade representou de 74 a 86 % na variação na absorção de P pelo trigo e de 94 % na produtividade de

grãos. Assim, foi evidenciando que os fatores quantidade e capacidade precisam ser considerados para definir status de P do solo.

A falta de concordância em relação aos métodos de determinação para avaliar a disponibilidade de P em solos está relacionada com a complexidade do comportamento do P em solos. As metodologias utilizadas na análise de solo buscam, em geral, avaliar preferencialmente o fator quantidade (SILVA; RAIJ, 1999).

Entre estes métodos podemos citar:

**Soluções ácidas:** dentre as soluções ácidas, a que se destaca no Brasil, devido ao seu uso em laboratórios de rotina de análise de solo, é a solução extratora chamada Mehlich-1 (M-1), oriunda de uma solução de  $\text{H}_2\text{SO}_4$   $0,0125 \text{ mol L}^{-1}$  +  $\text{HCl}$   $0,05 \text{ mol L}^{-1}$  (TEIXEIRA et al., 2017). Esta solução extratora dissolve predominantemente o P ligado ao Ca e quantidades menores de P ligado a Fe e Al, em função das características de solubilidade dos fosfatos (LARSEN, 1967; OLSEN; KHASAWNEH, 1980).

**Soluções ácidas com íon complexante:** Mehlich (1984) adaptou o método Mehlich-1, e obteve a última atualização, a solução extratora conhecida como Mehlich-3 (M-3), distinta da anterior devido a substituição do ânion cloreto pelo nitrato. Essa modificação visava a extinguir o efeito corrosivo de cloretos sobre equipamentos, consumíveis e pela adição de EDTA para complexar micronutrientes. A solução M-3 é oriunda dos reagentes  $\text{CH}_3\text{COOH}$   $0,2 \text{ mol L}^{-1}$  +  $\text{NH}_4\text{NO}_3$   $0,25 \text{ mol L}^{-1}$  +  $\text{NH}_4\text{F}$   $0,015 \text{ mol L}^{-1}$  +  $\text{HNO}_3$   $0,013 \text{ mol L}^{-1}$  + EDTA  $0,001 \text{ mol L}^{-1}$ .

**Resina trocadora de íons:** no Brasil, o método descrito por Raij et al. (1986) é feito com mistura de resinas de troca aniônica e catiônica saturadas com bicarbonato de sódio. Na suspensão aquosa de solo e resina dá-se o processo de extração do P gerando uma transferência do elemento para a resina, na qual o fosfato é adsorvido:  $\text{P lábil} \leftrightarrow (\text{H}_2\text{PO}_4^-)$  solução. Quando se usa uma resina trocadora de ânions saturada com o ânion bicarbonato, tem-se:  $\text{R-NH}_3^+\text{HCO}_3^- + \text{H}_2\text{PO}_4^- \leftrightarrow \text{R-NH}_3^+\text{H}_2\text{PO}_4^- + \text{HCO}_3^-$ . A reação é de equilíbrio; entretanto, como a capacidade de troca de ânions da resina é elevada, há a transferência do  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  da solução para a resina.

Silva e Raij (1999) afirmam que o método da resina tem os seguintes aspectos favoráveis: (a) pode ser usado tanto em solos ácidos como alcalinos; (b) revela, adequadamente, o efeito da calagem em elevar a disponibilidade de P para as plantas; (c) não superestima a disponibilidade de P em solos manejados com fosfatos naturais;

e (d) apresenta fundamento teórico para a determinação do chamado “fator quantidade” de P em solos, que é o mais importante índice da disponibilidade do nutriente.

Mumbach et al. (2018) avaliaram a influência do teor de argila na extração de P por M-1, M-3 e RTA, bem como a efetividade de utilização de equações para conversão dos teores por M-3 em valores equivalentes de M-1. Concluíram que os extratores M-3 e RTA extraíram quantidades de P 12 e 11 % superiores ao M-1, respectivamente e que M-1 extraiu menos P que M-3 e RTA em solos arenosos e extraiu mais P que os demais extratores em solos argilosos. A equação proposta pela CQFS – RS/SC (2016) para transformação dos teores de M-3 para equivalentes em M-1, subestimou os valores de P em até 24 %. Com isso, de forma alternativa, sugeriram a utilização da equação  $P\text{-M1 eq (mg dm}^{-3}\text{)} = (P\text{-M3}/(1,38-0,01*\text{teor de argila}))$ . A Comissão ainda relatou que os métodos estudados apresentam sensibilidade ao teor de argila do solo, devendo ser realizada a classificação da disponibilidade P por faixas de textura.

Estudando o mecanismo de atuação de extratores através do rastreamento das mudanças geradas nas formas de P do solo na sequência de três e treze extrações sucessivas com os métodos M-1, M3 e resina trocadora de ânions (RTA), Gatiboni et al. (2005) evidenciaram que os métodos Mehlich-1 e resina trocadora de ânions agiram principalmente sobre as frações inorgânicas, enquanto o método M-3 provocou a dessorção de P tanto de formas inorgânicas como de orgânicas. Os métodos M-1, M-3 e RTA dessorveram o P de acordo com a labilidade no solo, extraíndo, primeiramente, as formas mais lábeis e, posteriormente, as de menor labilidade. Bortolon e Gianello (2008) trabalharam com a interpretação de resultados analíticos de fósforo pelos extratores M-1 e M-3 em solos do Rio Grande do Sul e comparando os teores de P extraídos por estas soluções em 360 amostras de solos do Estado, concluíram que os teores de P extraídos pela solução M-3 foram, em média, 50 % maiores que os extraídos pela solução M-1 e que o conteúdo de argila, entretanto, teve influência na capacidade extrativa de P pela solução Mehlich-3, sendo necessária uma tabela de ajuste para a interpretação dos valores do P extraído por esta solução.

Brasil e Muraoka (1997) avaliaram a disponibilidade de fósforo através de três extratores (RTA, M-1 e M-3) em cinco solos da Amazônia com classes texturais distintas, adubados com doses de P oriundas de três fontes diferentes. Concluíram,

correlacionando a produção de matéria seca das plantas de arroz e feijão caupi e de P acumulado na parte aérea com os de teores de P nas amostras de cada solo, que o extrator M-1 extraiu grandes quantidades de fósforo nos tratamentos com fosfato natural da Carolina do Norte. Independentemente da fonte de fósforo utilizada, o extrator M-3 apresentou as melhores correlações com o feijão caupi e o arroz, maior sensibilidade às variações de solo e assim, mostrou-se adequado na avaliação da disponibilidade de fósforo para as plantas, em diferentes condições de solos e fontes de fósforo.

Reis et al. (2020), determinaram as taxas de recuperação de P do solo e níveis críticos pelos extratores M-1, M-3 e RTA, com 12 amostras de solos e seis doses de P. Foram cultivadas plantas de milho (*Zea mays* L.) por 45 dias em vasos em casa de vegetação. Após o cultivo as amostras de solo foram coletadas em cada unidade experimental, e a determinação da disponibilidade de P no solo foi realizada pelos extratores. Concluiu-se que o fósforo remanescente (P-rem) e o teor de argila foram as propriedades do solo que melhor se correlacionaram com as taxas de recuperação de P e níveis críticos de P no solo pelos métodos M-1 e M-3. A resina trocadora de íons não mostrou sensibilidade à capacidade tampão de P do solo. O M-3 tinha uma perda descontínua da capacidade de extração com o aumento da capacidade tampão de P do solo. Portanto, os autores recomendaram a utilização de M-3 como extrator de P em solos com características diferenciadas, porém, uma medida da capacidade tampão de P do solo, como o fósforo remanescente (P-rem) ou conteúdo de argila, deveria ser usada.

Simonete et al. (2015) avaliaram a eficiência dos extratores Mehlich-1, Mehlich-3 na predição da disponibilidade P para plantas de arroz cultivadas em sistema de alagamento em casa de vegetação, com cinco solos oriundos de várias lavouras orizícolas do estado de Santa Catarina. Concluíram que a quantidade de P absorvida pelas plantas de arroz aumentou com o acréscimo das doses de P aplicadas, variando com o tipo de solo. O P extraído pelo M-3 evidenciou melhor correlação com quantidade de P absorvida pelo arroz. Ressaltaram que a união dos solos segundo características relacionadas à adsorção de P melhora a eficiência de todos os métodos em predizer a disponibilidade de P em solos com a cultura do arroz sob sistema de inundação.

Viéguas et al. (2010) avaliaram o efeito da acidez do solo sobre a disponibilidade de P de fonte solúvel, com base no crescimento da planta e extratores químicos. Trabalharam com nove amostras de solos que foram incubadas com  $200 \text{ mg kg}^{-1}$  de P e diferentes níveis de acidez (previamente ajustados para  $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$  4,5; 5,0; 5,5; 6,0 e 6,5) e comparadas a solos sem aplicação de P. Após 40 dias de incubação no solo com o P, cada tratamento foi corrigido novamente para que todos os valores de pH fossem ajustados para 6,5 e, posteriormente, o sorgo foi semeado. Após a primeira e segunda calagem os teores de P foram determinados pelos extratores M-1 e RTA. Concluiu-se que os níveis de acidez não influenciaram a disponibilidade de P, medida pelo crescimento da planta e absorção de P. Para alguns solos, no entanto, esses valores aumentaram ou diminuíram de acordo com o pH inicial do solo (de 4,5 a 6,5). O crescimento da planta, a absorção de P e o P extraível por Mehlich-1 foram significativamente correlacionados, ao contrário do P extraível por resina, em valores de pH elevados para 6,5. Estas últimas correlações foram, entretanto, significativas antes da segunda calagem. Os teores de P extraídos por Mehlich-1 foram significativamente correlacionados entre si em toda a faixa de teste de acidez do solo, mesmo após o ajuste do pH para 6,5, além de depender da capacidade tampão do solo para o P. A resina também foi sensível às propriedades que expressam a capacidade tampão do solo para P, mas menos claramente do que Mehlich-1.

Partindo-se do princípio que a aplicação do silicato, que também atua na correção da acidez do solo, pode resultar em aumento na disponibilidade de P no solo para as culturas, Sandim et al. (2014) avaliaram a influência da silicatagem, em comparação à calagem, na dessorção de P em solos. Foram avaliados dois extratores. Estudaram três solos, três doses de P e quatro corretivos de acidez do solo, além de um tratamento sem correção da acidez, em casa de vegetação. As doses de P avaliadas foram 0, 50 e  $150 \text{ mg dm}^{-3}$ , tendo como fonte superfosfato triplo em pó. Observou-se que as escórias (silicatos) aumentaram os teores de P no solo, quando comparadas ao calcário, sugerindo a interação positiva entre Si e P no solo. O uso do Si não interferiu na escolha do extrator, pois tanto o M-1 como a RTA apresentaram o mesmo comportamento, quando houve a adição de Si ao solo em relação ao P extraído.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Localização do experimento

O estudo foi realizado no campo experimental da empresa Agronómico, localizado no município de Hernandarias – Paraguai (Latitude 25°15'54.25"S Longitude 54°51'22.47"W). Foram utilizados solos de áreas cultivadas da região Oriental do Paraguai.

#### 3.2 Condução do experimento

O critério para escolha dos solos foi a sua representatividade em relação a área cultivada. A classificação desses solos foi realizada de acordo com Nachtergaele (2001), adaptada para o Paraguai por Gorostiaga et al. (1995) e relacionada com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) (SANTOS et al., 2019). Desta forma, os solos utilizados nesse experimento foram:

- 1) Argissolo (Ultisol) - P: Municipio de Minga Guazu, Departamento de Alto Parana) = -25.367377° S; -54.859396° O.
- 2) Latossolo (Oxisol) - L: Municipio de Hernandarias, Departamento de Alto Parana) = -25.264684° S; -54.857721° O.
- 3) Nitossolo (Oxisol) - N: Municipio de Minga Guazu, Departamento de Alto Parana) = -25.374538° S; -54.858584° O.
- 4) Planossolo (Ultisol) - S: Municipio de Moises Bertoni, Departamento de Caazapa) = -26.456699° S; -56.745348° O.
- 5) Gleissolo (Aqualf) - G: Municipio de San Pedro de Ycuamandeyu, Departamento de San Pedro) = -23.668333° S; -57.174033° O.

O experimento foi conduzido no período de maio a setembro de 2023, em casa de vegetação. Foram utilizados vasos plásticos com furos de drenagem e capacidade para 3,0 dm<sup>3</sup>, preenchidos com amostras dos solos.

Para cada tipo de solo os tratamentos foram gerados pela combinação de um fatorial 4x2, sendo quatro doses de fósforo (0, 50, 150 e 300 mg kg<sup>-1</sup> de P) e duas condições de acidez do solo (com calagem e sem calagem). Foi utilizado o

delineamento experimental inteiramente casualizado (DIC), com quatro repetições, totalizando 160 unidades experimentais.

O milho (*Zea mays* L.), híbrido DKB 255PRO4, foi utilizado como espécie vegetal de referência.

### 3.3 Métodos analíticos e procedimentos

Todas as amostras de solo foram coletadas na camada de 0-20 cm. Os solos foram secos até peso constante em estufa com circulação forçada (Tecnal – TE-394/5) a uma temperatura de 40°C. Posteriormente, as amostras foram trituradas em moinho tipo martelo (Tecnal TE-330), em seguida peneiradas em malha de 2 mm para a realização das análises químicas e físicas, cujos resultados são apresentados na Tabela 1. A distribuição do tamanho das partículas (conteúdos de argila, areia e silte) foram determinadas pelo método de pipeta, utilizando hidróxido de sódio + hexametáfosfato de sódio como agente dispersante (TEIXEIRA et al., 2017). A caracterização química para fins de fertilidade dos solos foi realizada de acordo com Teixeira et al. (2017) e analisados o pH em cloreto de cálcio (pH em  $\text{CaCl}_2$ ); cálcio trocável ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnésio trocável ( $\text{Mg}^{2+}$ ) e alumínio trocável ( $\text{Al}^{3+}$ ) com extrator cloreto de potássio  $1 \text{ mol L}^{-1}$ ; potássio trocável ( $\text{K}^+$ ), cobre (Cu), ferro (Fe), zinco (Zn) e manganês (Mn) com extrator Mehlich-1 contendo  $\text{HCl } 0,05 \text{ mol L}^{-1} + \text{H}_2\text{SO}_4 0,0125 \text{ mol L}^{-1}$ ; acidez potencial (H+Al) foi estimada através da determinação do pH SMP (FORNASARI et al., 2023); carbono orgânico com dicromato de sódio  $0,667 \text{ mol L}^{-1}$  e  $5 \text{ mol L}^{-1}$  de ácido sulfúrico; enxofre ( $\text{S-SO}_4^{2-}$ ) com extrator de fosfato de cálcio  $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ ; boro (B) com solução extratora de cloreto de bário  $1,25 \text{ g L}^{-1}$  com aquecimento via micro-ondas (RAIJ et al., 2001) e fósforo remanescente (P-rem) com solução contendo  $60 \text{ mg L}^{-1}$  de P (ALVAREZ et al., 2000).

Para as extrações de fósforo disponível dos solos foram utilizadas as soluções extratoras Mehlich-1 ( $\text{HCl } 0,05 \text{ mol L}^{-1} + \text{H}_2\text{SO}_4 0,0125 \text{ mol L}^{-1}$ ), Mehlich-3 ( $\text{CH}_3\text{COOH } 0,2 \text{ mol L}^{-1} + \text{NH}_4\text{NO}_3 0,25 \text{ mol L}^{-1} + \text{NH}_4\text{F } 0,015 \text{ mol L}^{-1} + \text{HNO}_3 0,013 \text{ mol L}^{-1} + \text{EDTA } 0,001 \text{ mol L}^{-1}$ ) todos os procedimentos de extração e determinação segundo (SILVA, 2009) e resina trocadora de íons (Amberlite IRA-400 e Amberlite IR-120) sendo todo preparo de pré-condicionamento, tratamento da resina, extração e determinação baseado em Raij et al. (2001).

**Tabela 1.** Atributos químicos e físicos dos solos estudados.

Atributo	Solos				
	Argissolo	Latossolo	Nitossolo	Planossolo	Gleissolo
pH CaCl <sub>2</sub> (1:2,5) <sup>1/</sup>	4,15	4,10	4,21	4,29	4,14
M.O (g kg <sup>-1</sup> )	18,61	25,17	25,87	16,73	13,45
P (mg dm <sup>-3</sup> ) M-1	11,34	16,68	13,69	3,41	13,22
P (mg dm <sup>-3</sup> ) M-3	16,47	32,29	16,38	4,30	20,41
P (mg dm <sup>-3</sup> ) RTA	15,12	41,72	19,60	6,59	12,20
P-rem (mg dm <sup>-3</sup> )	41,56	23,99	35,39	43,43	49,43
K <sup>+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,14	0,23	0,13	0,14	0,06
Ca <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	2,58	4,34	4,44	2,27	3,02
Mg <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,59	1,16	1,28	0,47	0,61
Al <sup>3+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,39	1,05	0,29	0,29	0,17
H+Al <sup>3+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	4,88	7,26	6,06	3,37	3,44
m (%)	11,68	15,55	4,72	9,25	5,10
t (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	3,70	6,77	6,14	3,17	3,86
T (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	8,19	12,99	11,91	6,25	7,13
V (%)	40,40	44,06	49,08	46,02	51,33
Cu (mg dm <sup>-3</sup> )	4,23	3,78	3,59	0,93	2,28
Fe (mg dm <sup>-3</sup> )	66,12	33,42	38,44	119,92	133,42
Zn (mg dm <sup>-3</sup> )	2,62	3,01	5,47	1,78	2,19
Mn (mg dm <sup>-3</sup> )	85,56	93,38	118,33	19,12	37,73
Argila (%)	15,64	73,73	37,13	11,96	11,96
Silte (%)	24,91	23,92	27,87	23,35	21,95
Areia (%)	59,45	2,35	35,00	64,70	66,10
D <sub>s</sub> (kg dm <sup>-3</sup> )	1,207	1,031	1,130	1,361	1,376

<sup>1/</sup>Relação solo:solução 1:2,5; K, Cu, Mn, Fe e Zn - Extrator Mehlich-1; Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e Al<sup>3+</sup> - Extrator KCl 1,0 mol/L; H + Al – Estimado pelo pH SMP; t – Capacidade de Troca Catiônica Efetiva; T – Capacidade de Troca Catiônica a pH 7,0; V – Saturação por Bases; m – Saturação por Al; MO – Matéria Orgânica = C. Org × 1,724 (Walkley-Black – Colorimetria); P-rem – Fósforo Remanescente; P-M1 – Fósforo Mehlich-1; P-M3 – Fósforo Mehlich-3; P-RTA – Fósforo Resina Trocadora de Ânions; Argila, Silte e Areia - Densímetro Bouyoucos e D<sub>s</sub> – Densidade do Solo.

No caso dos solos corrigidos foi realizado o cálculo da necessidade de calagem de acordo com método da elevação da saturação de bases a 70 %, de acordo com SBCS/NEPAR (2017). Para uma rápida reação foi utilizado o carbonato de cálcio p.a.. A aplicação foi realizada na unidade experimental que se refere ao solo corrigido, ao contrário do solo natural que não sofreu nenhum ajuste em relação a sua acidez ativa, trocável e potencial. Os solos acondicionados nos vasos plásticos foram submetidos a umidade próxima a 80 % da capacidade de campo.

Após 15 dias da incubação do carbonato de cálcio, foram retirados  $100 \text{ cm}^{-3}$  de solo para determinação do pH  $\text{CaCl}_2$  e, após 28 dias, tanto o solo corrigido como o natural foram adubados de acordo com Reis et al. (2020). Foram aplicados via solução nutritiva  $300 \text{ mg dm}^{-3}$  de N  $[(\text{NH}_2)_2\text{CO}]$ ;  $160 \text{ mg dm}^{-3}$  de K (KCl),  $80 \text{ mg dm}^{-3}$  de S  $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]$ ,  $0,81 \text{ mg dm}^{-3}$  de B ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ),  $1,33 \text{ mg dm}^{-3}$  de Cu ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ),  $0,15 \text{ mg dm}^{-3}$  de Mo ( $\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) e  $4,0 \text{ mg dm}^{-3}$  de Zn ( $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ). Para aumentar os teores de magnésio trocável para 15 % na CTC foi calculado a quantidade para cada tipo de solo e aplicado via solução nutritiva, com cloreto de magnésio p.a.

Após 21 dias da aplicação dos nutrientes acima foi aplicado via solução nutritiva as doses de P (0; 50; 150 e  $300 \text{ mg kg}^{-1}$  de P), na forma de fosfato monoamônico ou MAP, solúvel, com 11 % de N e 60 % de  $\text{P}_2\text{O}_5$ . Em todos os tratamentos a dose de N a ser aplicada foi padronizada, para que todas as unidades experimentais recebessem a mesma quantidade de N, com aplicação de ureia (45 % de N). Decorridos 17 dias foram semeadas sete sementes do milho híbrido DKB 255PRO4. Aos 15 e 45 dias após a semeadura, foram aplicados 50 ml de uma solução de ureia ( $5 \text{ g L}^{-1}$ ) em todas as unidades experimentais para complementação da quantidade de N fornecida para as plantas.

O experimento foi conduzido com quatro plantas por vaso, cultivadas por 45 dias. Ao término do experimento todas as plantas foram cortadas na base do caule. Foram lavadas e secadas em estufa com circulação de ar a  $65 \text{ }^\circ\text{C}$  por 72 h. Após secas foram pesadas para determinação da produção de matéria seca da parte aérea. Posteriormente foram moídas em moinho tipo Willey. A determinação de P no tecido vegetal foi realizada por digestão nítrico-perclórica 3:1 e a dosagem realizada por espectrofotometria, utilizando-se o método do ácido ascórbico, conforme Carmo et al. (2000).

Os solos foram coletados em sua totalidade no vaso e enviados para análises. Foram secados em estufa com circulação de ar por 48 h a  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ , moídas em moinho tipo martelo e peneiradas com malha de 2,0 mm para análise do P disponível por M-1, M-3 (TEIXEIRA et al., 2017) e RTA.

A extração por Mehlich-1 foi realizada na proporção 1:10 solo: solução ( $5 \text{ cm}^{-3}$  para 50 mL do extrator). As amostras foram agitadas com a solução extratora por 5 min e posterior repouso de 16 horas para determinação dos teores de P.

Para extração com resina de troca iônica, foi utilizada uma mistura de resina de troca aniônica (Amberlite IRA-400) e resina de troca catiônica (Amberlite IR-120). As etapas de pré-condicionamento e tratamento da resina para uso foram realizadas conforme descrito em Raji et al. (2001). A extração foi realizada agitando-se 2,5 cm<sup>3</sup> de solo com 25 mL de água e bola de vidro por 15 minutos. Em seguida, a bola de vidro foi retirada e 2,5 cm<sup>3</sup> de resina trocadora de íons foram adicionados e agitados com solo e água por 16 h. Em seguida, a resina foi removida do solo e agitada por uma hora com uma solução de NH<sub>4</sub>Cl 0,8 mol L<sup>-1</sup> com HCl 0,2 mol L<sup>-1</sup> para desorver o P.

Para avaliação do M-3, a extração foi realizada com 2,5 cm<sup>3</sup> de solo e 25 mL da solução extratora. Em seguida a mistura foi agitada por 5 minutos em agitador horizontal circular à 200 rpm e filtrada em papel filtro quantitativo. Para a determinação foram transferidos 2 mL do extrato para tubo de 50 mL, adicionados 26 mL da solução de trabalho e agitado. Após 15 minutos, efetuou-se a determinação do P.

Após a obtenção dos extratos de cada extrator, a determinação do P foi realizada por espectrofotometria em 660 nm, utilizando-se o método do ácido ascórbico (TEIXEIRA et al., 2017).

Foram ajustadas equações de regressão relacionando a produção de matéria seca, a quantidade de P acumulada na parte aérea das plantas e os teores de P recuperados pelos extratores M-1, M-3 e RTI como variáveis das doses de P aplicadas e dos teores de P recuperados pelos extratores testados.

Foram ajustadas equações de regressão que relacionam a produção de matéria seca como variável das doses de P aplicadas, com as quais se calcularam os valores das doses de P associadas às produções de 90 % da máxima eficiência física. A partir dos valores das doses de P para MEE e das equações de regressão, que estimam o P extraído dos solos pelos extratores e o P acumulado na planta, como variáveis das doses de P aplicadas, foram calculados os níveis críticos de P nos solos, bem como correlações entre as variáveis para cada tipo de solo estudado.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Teores de fósforo pelos extratores Mehlich-1 (M-1), Mehlich-3 (M-3) e Resina Trocadora de Ânions (RTA)

Os teores de fósforo obtidos pelos extratores M-1, M-3 e RTA aumentaram linearmente com as doses de P adicionadas para todos os solos, tanto na ausência como na presença de calagem (Tabelas 2 e 3).

**Tabela 2.** Teores de fósforo disponível nos solos extraídos pelos extratores Mehlich-1 (M-1), Mehlich-3 (M-3) e resina trocadora de ânions (RTA), em função das doses de fósforo adicionadas, na presença e ausência de calagem.

Solo	Dose de P mg kg <sup>-1</sup>	Sem calagem			Com calagem		
		M-1	M-3	RTA	M-1	M-3	RTA
		----- mg dm <sup>-3</sup> -----					
Gleissolo	0	13,22	20,41	12,20	11,41	17,49	12,56
	50	25,39	37,37	18,82	25,26	34,74	19,53
	150	56,57	85,47	43,21	49,12	72,26	36,88
	300	92,45	136,81	74,94	115,06	157,66	124,30
Latossolo	0	16,68	32,29	41,72	15,67	22,05	34,11
	50	22,63	40,60	47,34	25,60	34,89	40,30
	150	39,34	68,48	76,86	44,72	66,88	67,25
	300	57,82	84,70	92,57	67,84	109,30	120,10
Planossolo	0	3,41	4,30	6,59	3,62	5,03	6,94
	50	9,00	15,16	11,28	8,89	12,89	11,28
	150	32,45	53,93	31,34	28,90	42,13	28,78
	300	89,63	149,77	87,88	56,09	80,69	58,86
Argissolo	0	11,34	16,47	15,12	11,17	17,90	13,63
	50	18,40	29,26	21,74	20,19	29,17	24,15
	150	38,11	63,87	44,30	40,19	63,15	40,94
	300	70,67	117,69	85,18	78,07	140,45	92,57
Nitossolo	0	13,69	16,38	19,60	18,38	19,25	24,01
	50	21,47	24,25	27,00	25,68	27,08	34,11
	150	39,40	51,66	51,25	44,74	51,43	64,34
	300	71,90	95,39	94,00	85,92	109,80	120,60

M-1 = Mehlich-1; M-3 = Mehlich-3; RTA = resina trocadora de ânions

**Tabela 3.** Equações para os teores de fósforo recuperados pelos extratores Mehlich-1, Mehlich-3 e resina trocadora de ânions, em função das doses de fósforo adicionadas, na presença e ausência de calagem.

Solo	Sem calagem			Com calagem		
	b <sub>0</sub>	b <sub>1</sub>	R <sup>2</sup>	b <sub>0</sub>	b <sub>1</sub>	R <sup>2</sup>
Mehlich-1 (M-1)						
Gleissolo	0,2674	13,487	0,997**	0,3437	7,2505	0,979*
Latossolo	0,1394	16,689	0,996**	0,1736	16,761	0,996**
Planossolo	0,2932	-3,0355	0,969*	0,1794	1,9505	0,996**
Argissolo	0,2004	9,5743	0,996**	0,2239	9,4148	0,995**
Nitossolo	0,1952	12,220	0,996**	0,2272	15,271	0,986**
Mehlich-3 (M-3)						
Gleissolo	0,3948	20,671	0,994**	0,4687	11,95	0,987**
Latossolo	0,1801	34,007	0,958*	0,2939	21,548	0,999**
Planossolo	0,493	-5,8397	0,971*	0,2586	2,8554	0,996**
Argissolo	0,3417	14,105	0,998**	0,4139	10,923	0,980**
Nitossolo	0,2689	13,307	0,994**	0,306	13,641	0,976*
Resina trocadora de ânions (RTA)						
Gleissolo	0,2144	10,491	0,996**	0,3741	1,5583	0,917*
Latossolo	0,1782	42,346	0,951*	0,2936	28,744	0,983**
Planossolo	0,2761	-0,2367	0,958*	0,1773	4,3067	0,989**
Argissolo	0,2380	11,837	0,990**	0,2611	10,183	0,973*
Nitossolo	0,2525	16,401	0,992**	0,3267	19,923	0,991**

\*, \*\* significativo a 5 e 1 % respectivamente.

A recuperação de P variou em relação aos solos, aos extratores e, para alguns destes, com a calagem (aplicação do carbonato de cálcio), como observado pelas declividades das equações ajustadas (Tabela 3). Em termos médios, a recuperação de fósforo, considerando-se o Gleissolo, na ausência ou presença de calagem, obedeceu à sequência M-3 > M-1 > RTA. Considerando-se o Latossolo e o Nitossolo, na ausência ou presença de calagem, a sequência foi RTA > M-3 > M-1 e, se considerados o Planossolo e o Argissolo, tanto na ausência como na presença de calagem a sequência foi M-3 > RTA > M-1. Em trabalho semelhante Steiner et al. (2012), trabalhando com 12 tipos de solos diferentes no Estado do Paraná, observaram menor extração de P quando utilizado o extrator M-1 para Argissolos, Latossolos e Nitossolos. Menores extrações de P com o M-1 foram também apresentadas em trabalhos como Bortolon e Gianello (2008) e Schlindwein et al.

(2011). O Latossolo estudado possui alta capacidade tampão e teor de argila de 74 % (Tabela 1). Tal fato, aliado ao tempo de sedimentação de 16 horas utilizado no método M-1 e por ele extrair P por dissolução seletiva das frações mais lábeis, devido à redução de pH do meio, pode levar ao desperdício da capacidade de extração, ocorrendo assim a readsorção do P já dissolvido, tendo como resultado menores valores de P recuperados em solos argilosos, conforme Freitas et al. (2013) e Silva e Raji (1999). O mesmo raciocínio se aplica ao Nitossolo. Estudando solos do Sul do Brasil, entre eles, Latossolo e Nitossolo com  $13,9 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  de CTC e 40 % de argila, em média, Gonçalves et al. (2011) relataram menores recuperações de P nestes solos utilizando o extrator Mehlich-1. Estes tipos de solos tendem a neutralizar o ácido diluído, reduzindo a capacidade da solução em extrair P pela alta capacidade de troca de cátions e óxidos de ferro presentes, principalmente goethita e hematita.

Por outro lado, as quantidades mais elevadas de fósforo extraídas pelo método da RTA, em comparação com o método M-1 no Latossolo, Nitossolo, Argissolo e Planossolo, podem ser atribuídas ao extenso período de agitação (16 horas) e saturação da RTA com ânion bicarbonato. Esse processo extrai o fósforo adsorvido nas superfícies dos coloides até atingir um equilíbrio eletroquímico entre o solo e a superfície da resina, conforme descrito por Gonçalves et al. (2011).

Já as maiores recuperações obtidas pelo extrator Mehlich-3 no Gleissolo, Planossolo e Argissolo do presente estudo são atribuídas às propriedades químicas específicas do extrator, que tem uma preferência por extrair predominantemente o fósforo associado a ferro e alumínio, e extrair em menor medida, o fósforo ligado ao cálcio, ao contrário do Mehlich-1 que extrai preferencialmente as formas de P ligadas ao Ca, conforme Bortolon e Gianello (2008). Outra observação importante no M-3 é que pela presença de EDTA no preparo da solução ao extrator pode extrair algumas formas orgânicas de P, conforme observado por Gatiboni et al. (2005).

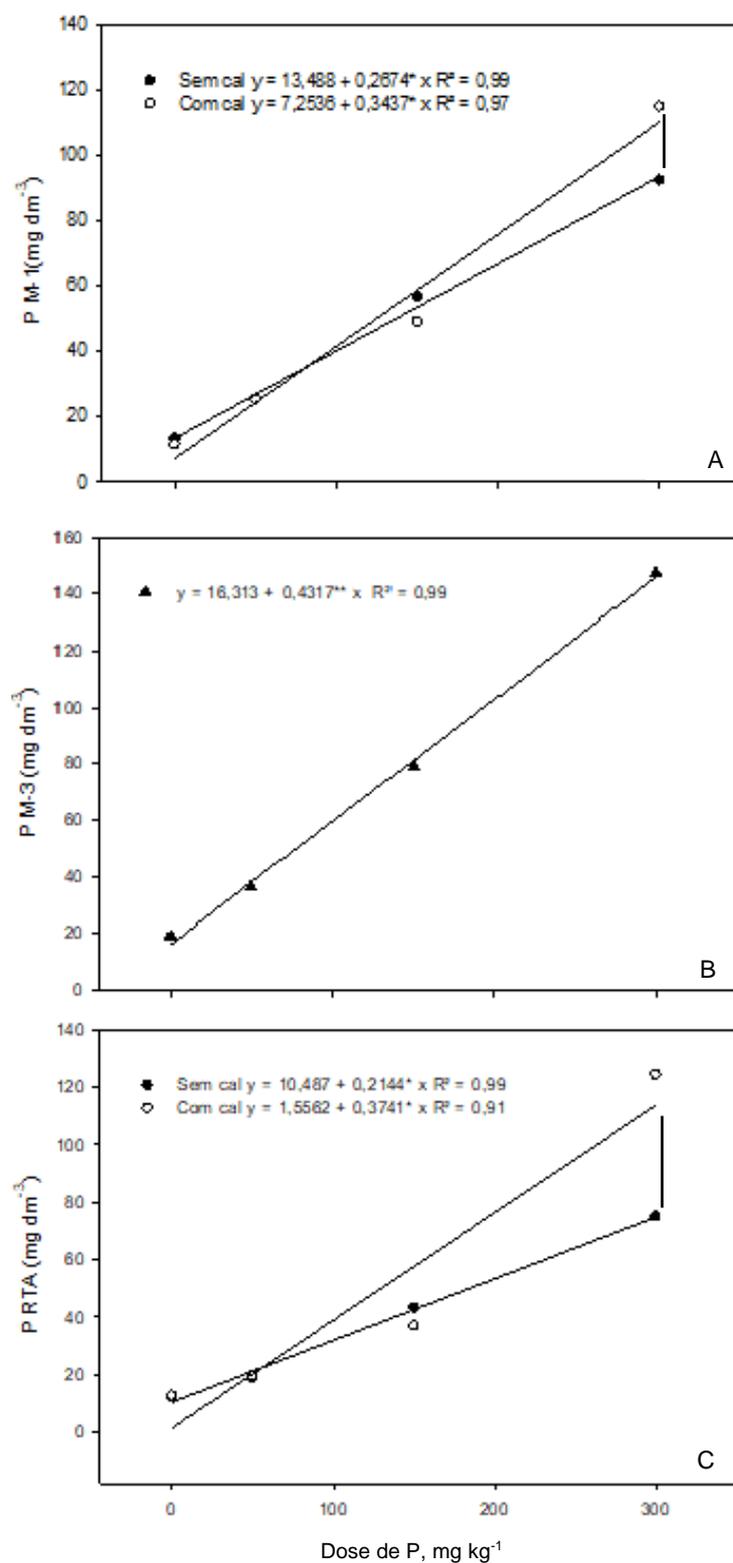
O teor de fósforo extraído pelos extratores em relação às doses aplicadas é conhecido como a recuperação desse elemento. É importante saber se a taxa de recuperação é ou não influenciada por características do solo que refletem sua capacidade tampão. Em outras palavras, se ocorre desgaste do extrator. Desta maneira, Reis et al. (2020) indicaram que a recuperação de P adicionado é maior em solos com menor capacidade tampão (solos arenosos) como é o caso do Planossolo, Argissolo e Gleissolo utilizados no presente estudo em relação a solos com maior

capacidade tampão (solos argilosos), como o Latossolo e o Nitossolo. Assim, foi verificado desgaste dos extratores M-1 e M-3 no presente estudo em solos com maiores teores de argila.

Em relação à sensibilidade do método em extrair fósforo em maior quantidade com o aumento de pH, de acordo com as doses aplicadas desse elemento, o fósforo extraído por M-3 não diferiu com a calagem, para o Gleissolo. Assim, esse extrator não foi sensível ao aumento do pH do solo na recuperação do P. Por este motivo a figura 1 B apresenta uma única equação para representar a relação fósforo adicionado e fósforo recuperado por M-3. Devido a inexistência de trabalhos avaliando o efeito da calagem na recuperação de P utilizando o M-3 como extrator em Gleissolos tanto no Paraguai como no Brasil, este resultado pode ser explicado pela pequena variação de pH em  $\text{CaCl}_2$  em relação aos ambientes com e sem calagem (Tabela 4). A grande dificuldade e a falta de consistência na pesquisa de extratores do “P-disponível” são mostradas no trabalho de Viégas et al. (2010).

**Tabela 4.** Médias do pH em  $\text{CaCl}_2$ , Saturação por Alumínio (m %) e Saturação por Bases (V %) das quatro doses de P aplicadas na ausência e presença de calagem após 60 dias da incubação.

Solo	Sem calagem	Com calagem
	pH em $\text{CaCl}_2$	
Gleissolo	4,17	5,05
Latossolo	4,22	5,13
Planossolo	4,25	4,78
Argissolo	3,98	4,62
Nitossolo	4,40	5,12
	Saturação por Alumínio (m %)	
Gleissolo	7,17	0,32
Latossolo	12,56	0,56
Planossolo	11,08	0,81
Argissolo	15,45	1,02
Nitossolo	2,55	0,03
	Saturação por Bases (V %)	
Gleissolo	43,95	63,77
Latossolo	45,83	63,07
Planossolo	44,65	62,15
Argissolo	35,77	55,10
Nitossolo	53,51	66,67

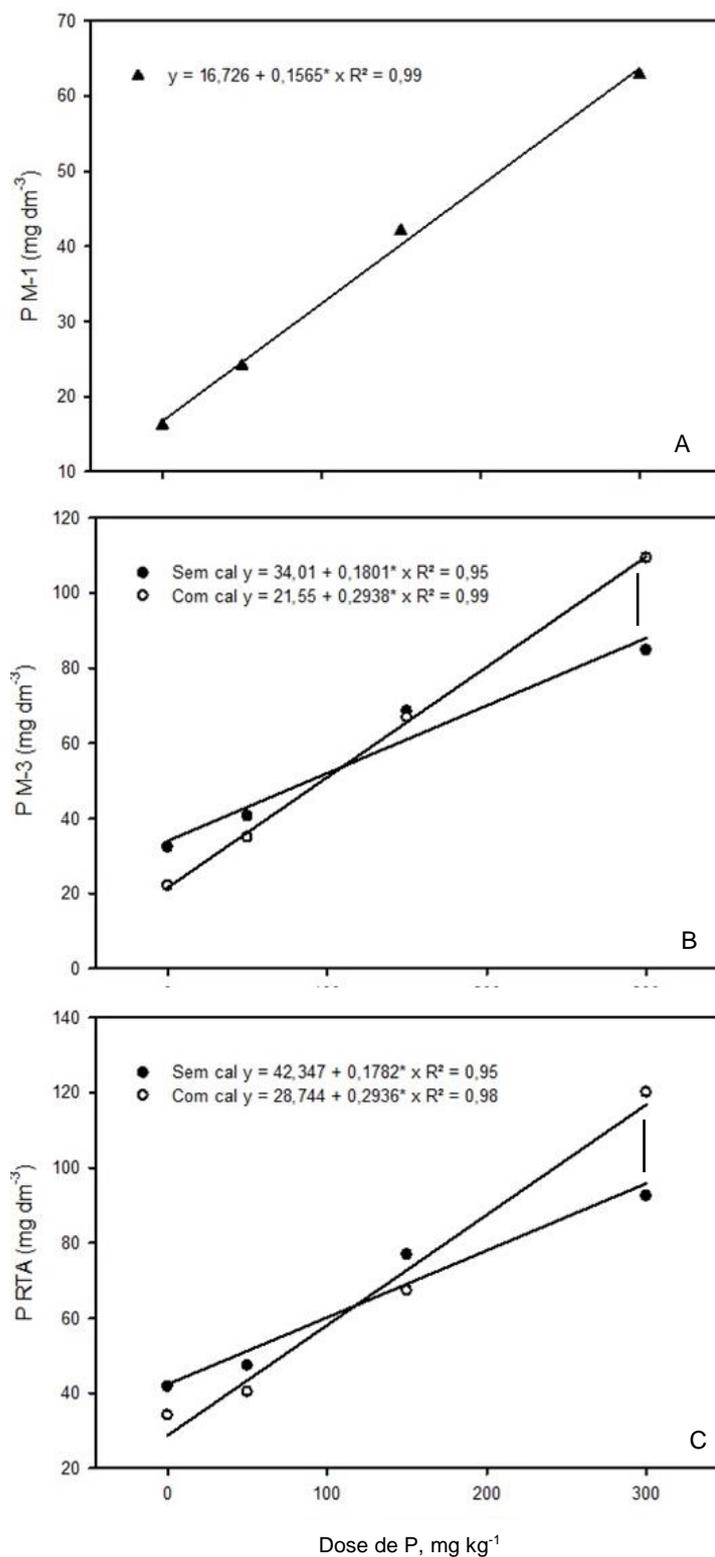


**Figura 1.** Teores de fósforo recuperados pelo extrator M-1 (A), M-3 (B) e RTA (C) em função das doses desse elemento adicionadas em Gleissolo, na ausência e presença de calagem. Barra vertical indica a diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de F em  $p < 0,05$ .

No caso do M-1 e RTA (Figura 1A e 1C), no Gleissolo, teor de fósforo extraído diferiu com a calagem, ou seja, esses extratores foram sensíveis ao aumento do pH (Tabela 4) do solo na recuperação de P somente na dose máxima adicionada de 300 mg kg<sup>-1</sup> de P. Nessa condição, o M-1 extraiu 19,7 % a mais de P e a RTA 39,7 %.

Em solos ácidos, a presença de uma considerável quantidade de sítios de adsorção de fósforo (fosfato) resulta no consumo de íons sulfato do extrator M-1 por grupos funcionais não ocupados pelo fósforo. A aplicação de calcário reduz sítios de adsorção desse elemento, resultando em uma maior substituição de sulfato do extrator pelo fosfato adsorvido ao solo. Esse processo reduz o desgaste do extrator, conforme observado por Bortolon et al. (2009). Assim, a calagem tem o efeito de aumentar a disponibilidade de fósforo para as plantas, uma resposta que foi identificada pelo extrator M-1. Avaliando o efeito da reação do solo na disponibilidade de P, Muniz (1995) observou que predominou efeito crescente de doses na extração de P resina, obtendo correlações entre pH CaCl<sub>2</sub> e P extraído por RTA. Afirmou também, que com a elevação do pH ocorre a formação de compostos de P-Ca meta-estáveis que são mais solúveis que os compostos P-Fe e P-Al que ocorrem em condições ácidas.

No caso do Latossolo, não houve diferença na quantidade de fósforo extraída pelo M-1 com a calagem (pH CaCl<sub>2</sub> = 5,13) em comparação com a não utilização dessa prática. Assim, não foi verificada capacidade do método de extrair fósforo em quantidades maiores em resposta ao aumento do pH (Tabela 4), de acordo com as doses aplicadas. Isso mostrou não haver sensibilidade do M-1 ao aumento do pH do Latossolo no processo de recuperação desse nutriente. Na figura 2-A, por isso, só é apresentada uma única equação para representar a relação entre o fósforo adicionado e o fósforo recuperado pelo M-1. Trabalhando com fósforo extraído por M-1 e RTA em Latossolo Vermelho Distrófico típico do sudoeste de Goiás, Barbosa et al. (2015), também verificaram baixa sensibilidade do M-1 à prática da calagem em relação à extração do P. O ponto de máxima disponibilidade de fósforo na solução do solo é geralmente em torno de pH em água 6,0 (OLSEN; KHASAWNEH, 1980). No entanto, o aumento do pH da solução do solo para valores próximos a 6,0 no trabalho de Barbosa et al. (2015) não resultou em uma maior extração de fósforo pelo M-1.



**Figura 2.** Teores de fósforo recuperados pelo extrator M-1 (A) M-3 (B) e RTA (C) em função das doses desse elemento adicionadas em Latossolo, na ausência e presença de calagem. Barra vertical indica a diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de F em  $p < 0,05$ .

Raij e Quaggio (1990) obtiveram resultados semelhantes ao relacionar o pH e o fósforo disponível no solo em quatro experimentos conduzidos em condições de campo. O fósforo determinado pelo extrator M-1 não apresentou aumento devido ao efeito do corretivo de acidez do solo aplicado. A calagem interfere nos teores de fósforo disponível devido ao processo de fixação do fosfato com o cálcio, proveniente do  $\text{CaCO}_3$  que ainda não reagiu com a solução do solo, além do cálcio liberado pelo próprio extrator ácido. De acordo com Novais e Smyth (1999), o aumento no teor de cálcio trocável pode levar à precipitação do fósforo, formando fosfatos bi e tricálcicos de baixa solubilidade, o que reduz os valores de fósforo extraídos pelo método M-1.

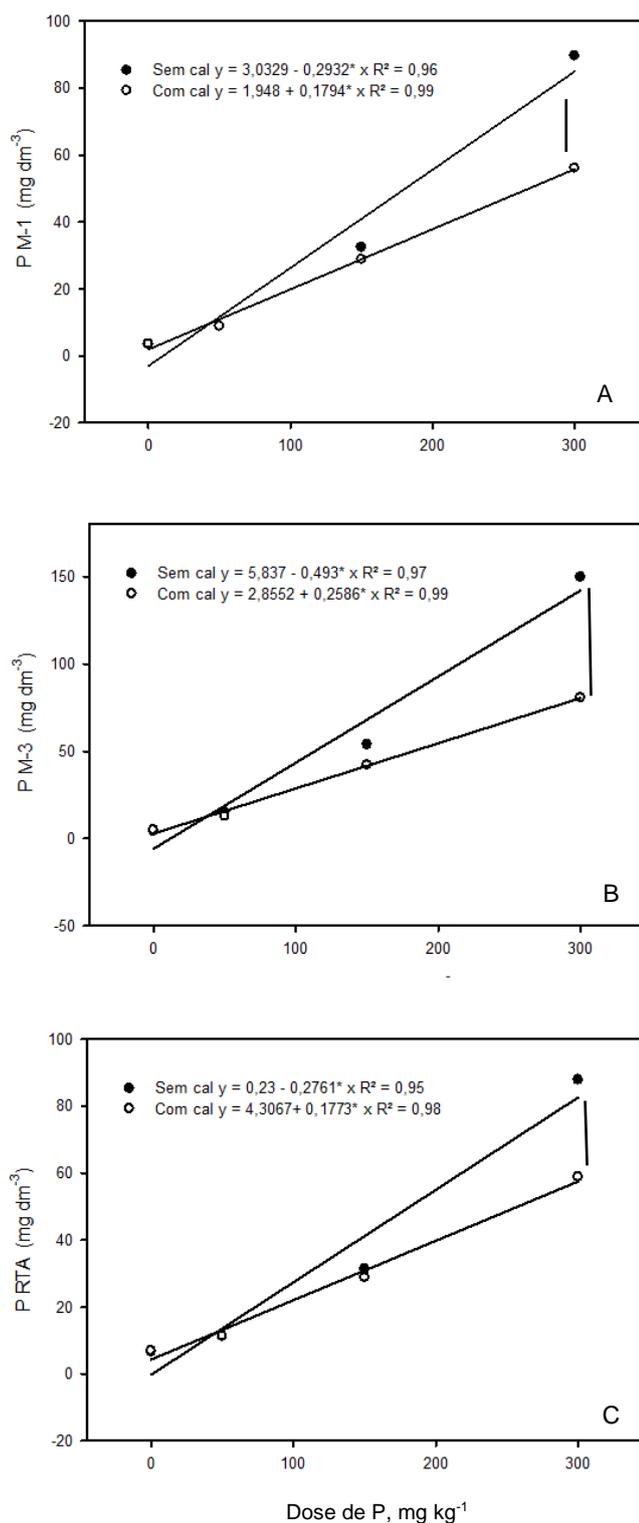
Resultados contrários foram obtidos por Nolla et al. (2020), em Latossolo Vermelho Distrófico típico, em um experimento conduzido em Maringá, PR, onde o pH  $\text{H}_2\text{O}$  do solo em condições naturais era de 5,3 (aproximadamente 4,6 em  $\text{CaCl}_2$ ). Os níveis de P aumentaram de  $13 \text{ mg dm}^{-3}$  para  $20,7 \text{ mg dm}^{-3}$  com a aplicação de calcário (quantidade para aumentar a saturação por bases a 60 %). Essa situação ocorreu devido a capacidade do calcário de reduzir a solubilidade dos óxidos de ferro, uma vez que é a parte ativa da argila que possui cargas elétricas dependentes do pH. Conseqüentemente, há uma diminuição na capacidade de adsorção de fosfato, resultando em uma maior eficiência na disponibilização de fósforo, especialmente quando o pH em  $\text{H}_2\text{O}$  permanece abaixo de 6,5, como indicado por Novais e Smyth (1999).

No caso do M-3 (Figura 2B) e da RTA (Figura 2C) no Latossolo, o fósforo extraído no solo diferiu com a calagem, ou seja, esses extratores foram sensíveis ao aumento do pH (Tabela 4) do solo na recuperação de P, somente na dose máxima adicionada de  $300 \text{ mg kg}^{-1}$ . Para M-3 quando adicionadas  $300 \text{ mg dm}^{-3}$  de P do solo sem calagem foram extraídos  $84,7 \text{ mg dm}^{-3}$  e com calagem  $109,3 \text{ mg dm}^{-3}$  de P, sendo 22,5 % de recuperação. No caso da RTA quando adicionadas  $300 \text{ mg dm}^{-3}$  de P, no solo sem calagem foram extraídos  $92,57 \text{ mg dm}^{-3}$  e com calagem  $120,10 \text{ mg dm}^{-3}$  de P, sendo 22,9 % de recuperação.

Camargo et al. (2010) avaliaram a RTA como extrator de P em Latossolo, Nitossolo e Argissolo da região do triângulo mineiro, em relação a quatro doses de calcário e constataram que as doses de calcário aumentaram o teor de P extraído e este aumento se deu em função da elevação do pH. Trabalhando com extratores para avaliação da disponibilidade de fósforo para plantas de milho em solos representativos

do estado da Paraíba, Farias et al. (2009) apresentaram resultados que corroboram com os apresentados nas figuras 2 (B) e 2 (C) onde o extrator RTA e M-3 extraíram mais P em doses maiores desse elemento (205 e 410 mg dm<sup>-3</sup>). O mesmo foi encontrado por Muniz (1995) que verificou aumento na quantidade de P extraída pela RTA com a calagem e, de modo similar, a relação pH em CaCl<sub>2</sub> e P resina apresentou elevados coeficientes de correlação, altamente significativos. A extração de P pelo método da RTA, por meio da saturação com íon bicarbonato, contribui para uma certa estabilidade no pH do meio, atuando como um tipo de tamponamento induzido e consequentemente isso mantém o ambiente da solução do solo com valores constantes, próximos à faixa de maior disponibilidade do nutriente, conforme Barbosa et al. (2015). Assim, segundo Camargo et al. (2010), os níveis mais elevados de fósforo extraído são atribuídos ao aumento do pH do solo devido à aplicação de calcário que faz com que ocorra à precipitação do alumínio e ferro da solução e à redução da adsorção de íons fosfato.

No que se refere à capacidade do método de extrair fósforo em maior quantidade com o aumento do pH (Tabela 4) conforme as doses aplicadas, para o Planossolo, houve diferença significativa na recuperação do fósforo extraído pelo M-1, M-3 e RTA com a aplicação de calagem. O desempenho desses extratores foi influenciado pelo aumento do pH do solo na recuperação de fósforo neste solo, ou seja, na maior dose de P (300 mg dm<sup>-3</sup>) houve um aumento significativo na recuperação desse elemento sem calagem conforme figuras 3 A a 3 C. O M-3, quando adicionado 300 mg dm<sup>-3</sup> de P, extraiu do solo sem calagem 149,77 mg dm<sup>-3</sup> e com calagem 80,69 mg dm<sup>-3</sup> de P, sendo 46,1 % a mais de recuperação. Na RTA foi 33 % e no M-1, 37,4 % a mais de recuperação.

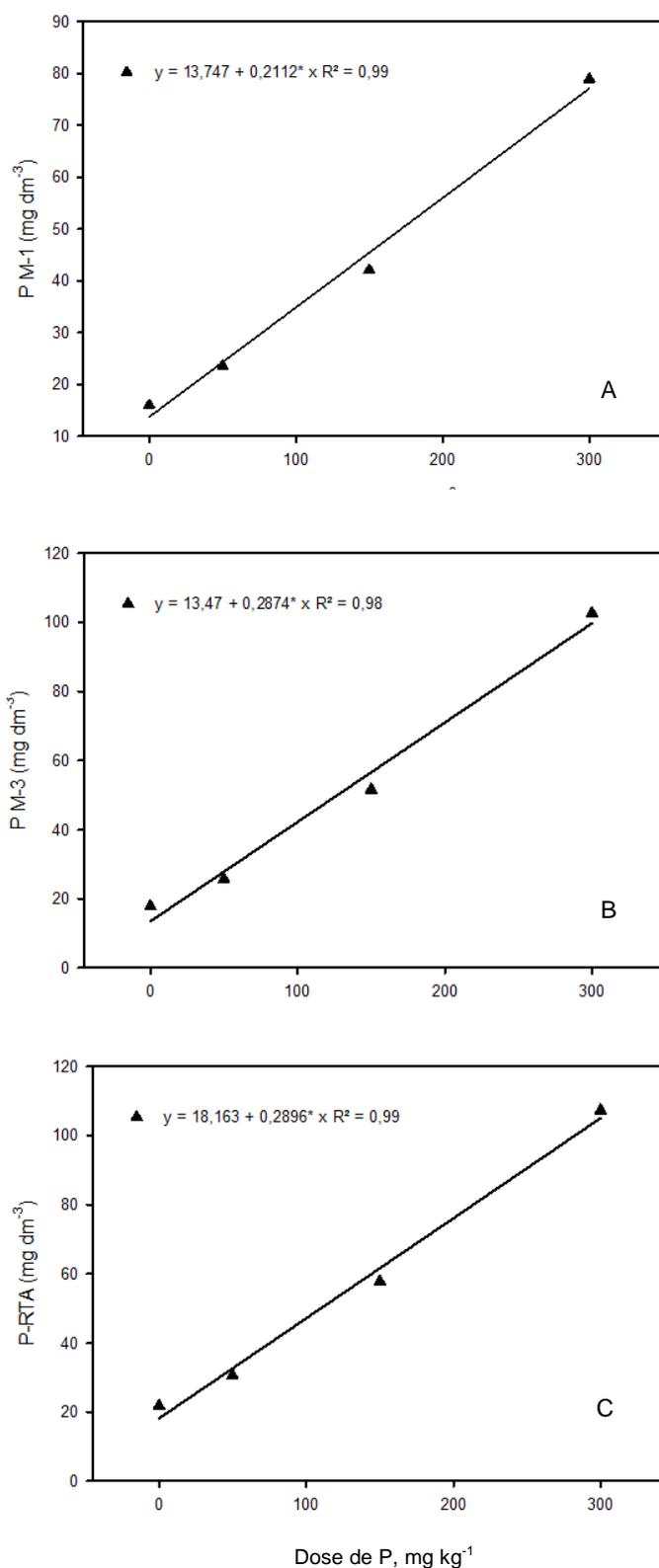


**Figura 3.** Teores de fósforo recuperados pelo extrator M-1 (A) M-3 (B) e RTA (C) em função das doses desse elemento adicionadas em Planossolo, na ausência e presença de calagem. Barra vertical indica a diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de F em  $p < 0,05$ .

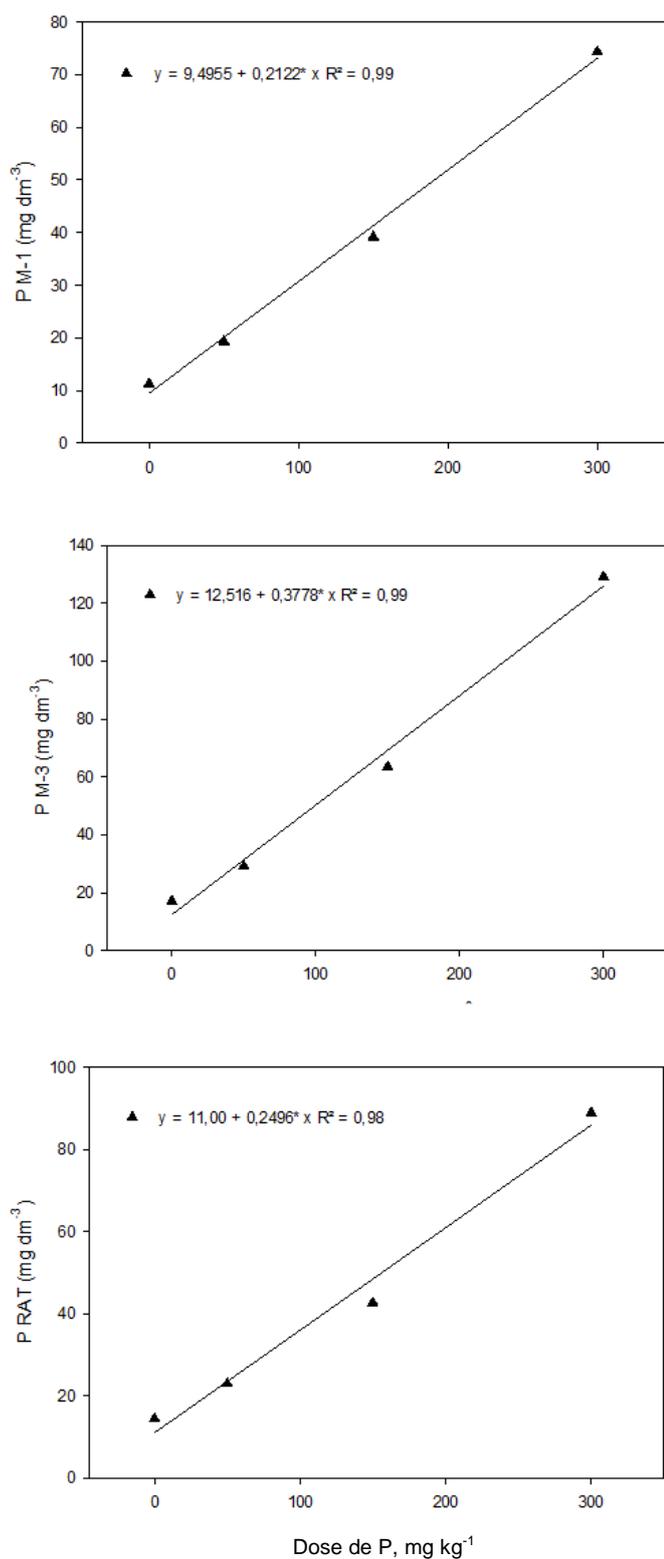
O solo que não recebeu calagem na dose mais alta de P apresentou em média pH em  $\text{CaCl}_2$  de 4,39 (CV 1,20 %) e onde houve calagem, na dose maior de P o pH em  $\text{CaCl}_2$  médio foi de 4,86 (CV 0,51 %). Ambos pHs considerados médios de acordo com a SBCS/NEPAR (2017), sendo provável que esta pequena diferença entre os valores de pH não foi suficiente para disponibilizar mais fósforo nos tratamentos em que houve aplicação de calagem. Vale ressaltar que foi realizada aplicação de corretivo para elevar a saturação por bases a 80 % em todos os solos. Porém, no Planossolo, foi demonstrado que a incubação com carbonato de cálcio através do método do V % não foi eficiente. Silva e Ranno (2005) avaliaram a relação entre a calagem e o P extraído por M-1 em solos de várzea como Planossolos e Gleissolos e verificaram que os teores de P na solução do solo não foram afetados pela prática da calagem nas doses de calcário aplicadas. Já Mello et al. (1999), verificaram que a aplicação de calcário resultou em um aumento nas taxas de recuperação de fósforo pelos extratores M-1 em nove solos de várzeas de Minas Gerais. Afirmaram que é possível que, ao estabilizar os óxidos de ferro ativos presentes nos solos, a calagem leve à redução da superfície disponível para a adsorção específica do fósforo e/ou para reações de precipitação. Isso pode se traduzir em aumentos nas taxas de recuperação do fósforo adicionado.

No Nitossolo e no Argissolo não houve diferença significativa na extração de fósforo em relação as doses aplicadas de P na ausência ou presença de calagem (Tabela 4) para os três extratores (M-1, M-3 e RTA), conforme figuras 4 e 5. Por este motivo cada figura apresenta uma única equação para representar a relação fósforo adicionado e fósforo recuperado pelos extratores. Com calagem o Nitossolo e o Argissolo apresentaram pH em  $\text{CaCl}_2$  em média de 5,12 e 4,62, respectivamente. É provável que nestas condições de pH não foi possível avaliar uma diferença significativa nas recuperações de P com distintos extratores.

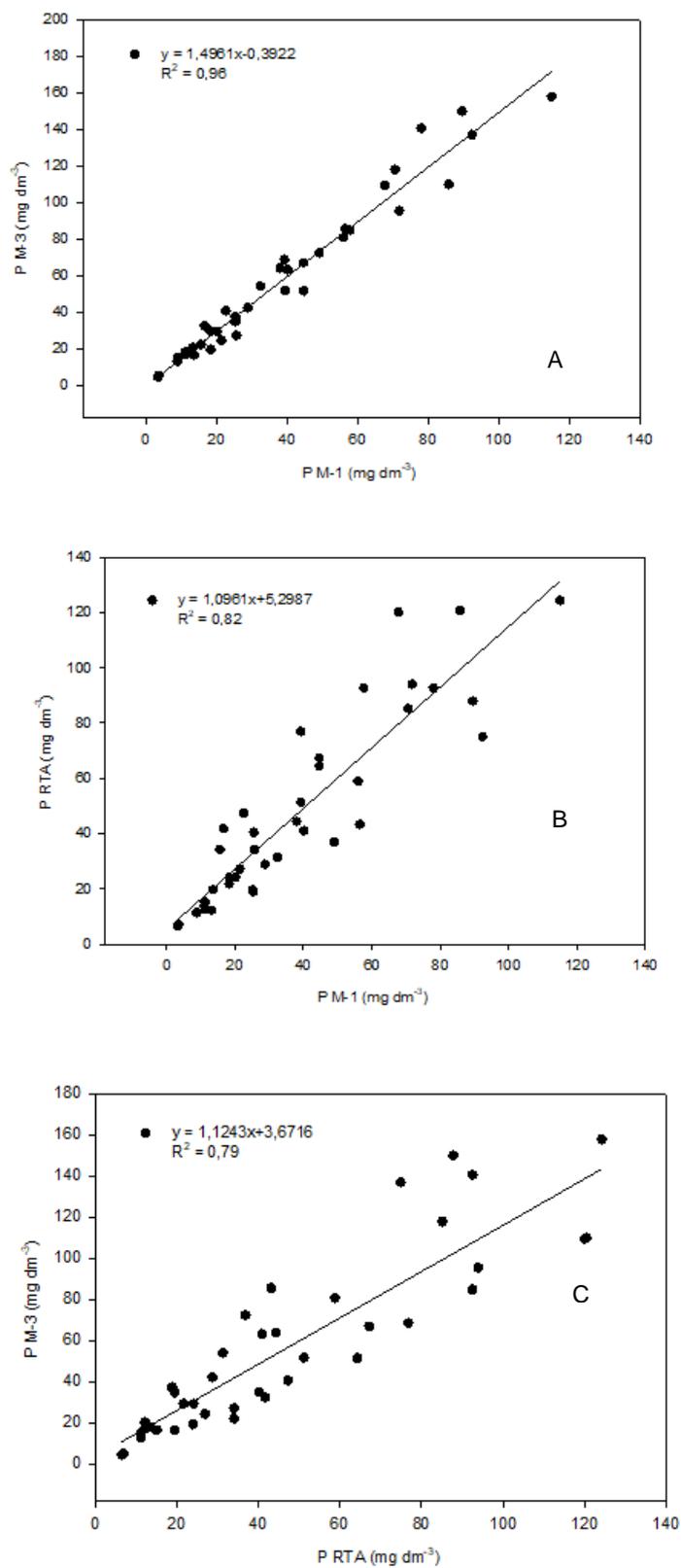
Houve uma forte correlação entre extratores, evidenciada pelo alto coeficiente de determinação entre eles conforme apresentado na figura 6(A) e 6(B). A equação de regressão linear que define a relação entre o P extraído com M-1 e o M-3 é  $P_{M-3} = 0,3922 - (1,4961 * P_{M-1})$  ( $r = 0,96^{**}$ ) conforme figura 6 (A). O extrator M-3 extraiu mais P do que o extrator M-1 quando foram reunidos todos os tipos de solos.



**Figura 4.** Teores de fósforo recuperados pelo extrator M-1 (A) M-3 (B) e RTA (C) em função das doses desse elemento adicionadas em Nitossolo, na ausência e presença de calagem.



**Figura 5.** Teores de fósforo recuperados pelo extrator M-1 (A) M-3 (B) e RTA (C) em função das doses desse elemento adicionadas em Argissolo, na ausência e presença de calagem.



**Figura 6.** Correlação entre os teores de P disponível pelos extratores M-1 e M-3 (A); M-1 e RTA (B); RTA e M-3 (C). Correlação realizada com as médias de todas as unidades experimentais  $p < 0,0001$ .

Sobral et al. (2008), avaliando relações entre os extratores M-1, M-3 e RTA para P em solos dos Tabuleiros Costeiros (Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Bahia) no Brasil, verificou resultados semelhantes ao presente estudo entre a relação do P extraído entre M-1 e M-3 com  $r = 0,96^{**}$ . Corrales (2013), estudando 21 solos da Costa Rica evidenciou coeficiente de correlação linear entre M-1 e M-3 de  $0,91^{***}$ .

Reis et al. (2020) avaliaram solos com diferentes características mineralógicas, texturais, teores de matéria orgânica, disponibilidade de P e, por isso, distintas capacidades tampão de fosfato. Foram 11 solos do Estado de Minas Gerais e um solo do Estado do Espírito Santo. Foi verificada alta relação entre os extratores M-1 e M-3, similarmente ao presente estudo (Figura 6A).

Em cinco solos da Amazônia cultivados com caupi e arroz, Brasil e Muraoka (1997) observaram que os coeficientes de correlação entre os teores de fósforo extraídos pelos métodos M-1 e M-3 foram relativamente baixos. Para amostras coletadas antes do plantio do caupi, o coeficiente foi de  $r = 0,52$ , e para amostras coletadas antes do plantio do arroz, foi de  $r = 0,57$ . Já em 360 amostras de solo do Rio Grande do Sul, Bortolon e Gianello (2008) encontraram relação entre os métodos de extração M-1 e M-3, com  $r = 0,95$ . Resultados semelhantes foram obtidos em um estudo envolvendo seis solos do Estado do Rio Grande do Sul, com um coeficiente de correlação de  $r = 0,99^*$  entre esses dois extratores de P, conforme Bortolon et al. (2009).

Comparando os teores de P disponível pelo extrator M-1 e RTA realizada com as médias de todas as unidades experimentais (Figura 6B), houve relação entre as soluções extratoras, evidenciada pelo coeficiente de correlação entre eles. A equação de regressão linear que define a relação entre o P extraído com M-1 e a RTA é  $P_{RTA} = 5,2987 + (1,096 \cdot P_{M-1})$  e  $r = 0,82^{**}$ . A RTA extraiu mais P do que o extrator M-1 quando foram reunidos os dados de todos os solos. Calibrando os métodos M-1, M-3 e RTA pela relação entre os teores de P extraídos do solo com produtividade das culturas de feijão e milho em Latossolo Vermelho-escuro argiloso, Miranda e Azevedo (2002) encontraram relação significativa entre os métodos de extração de P e concluiu que o método da RTA extraiu mais P do que o M-1 neste tipo de solo. Bissani et al. (2002) demonstraram relação entre M-1 e RTA com  $r = 0,73^{**}$  trabalhando com 20 solos do Rio Grande do Sul, utilizando trigo como planta indicadora.

Comparando os teores de P disponível pelo extrator RTA e M-3 realizada com as médias de todas as unidades experimentais, houve relação entre os métodos de extração, conforme coeficiente de correlação entre eles, como pode ser verificado na figura 6C. A equação de regressão linear que define a relação entre o P extraído com RTA e M-3 é  $P_{M-3} = 3,6716 + (1,1243 \cdot P_{RTA})$ ;  $r = 0,79^{***}$ , conforme figura 6C. A equação indica que o extrator M-3 extrai mais P do que o extrator RTA quando foram reunidos os dados de todos os solos avaliados. Coeficiente de correlação superior ao do presente estudo entre os teores de P disponível extraídos pela RTA e o Mehlich-3 foram encontrados por Reis et al. (2020), com  $r = 0,93$ .

## 4.2 Fósforo recuperado pelas plantas

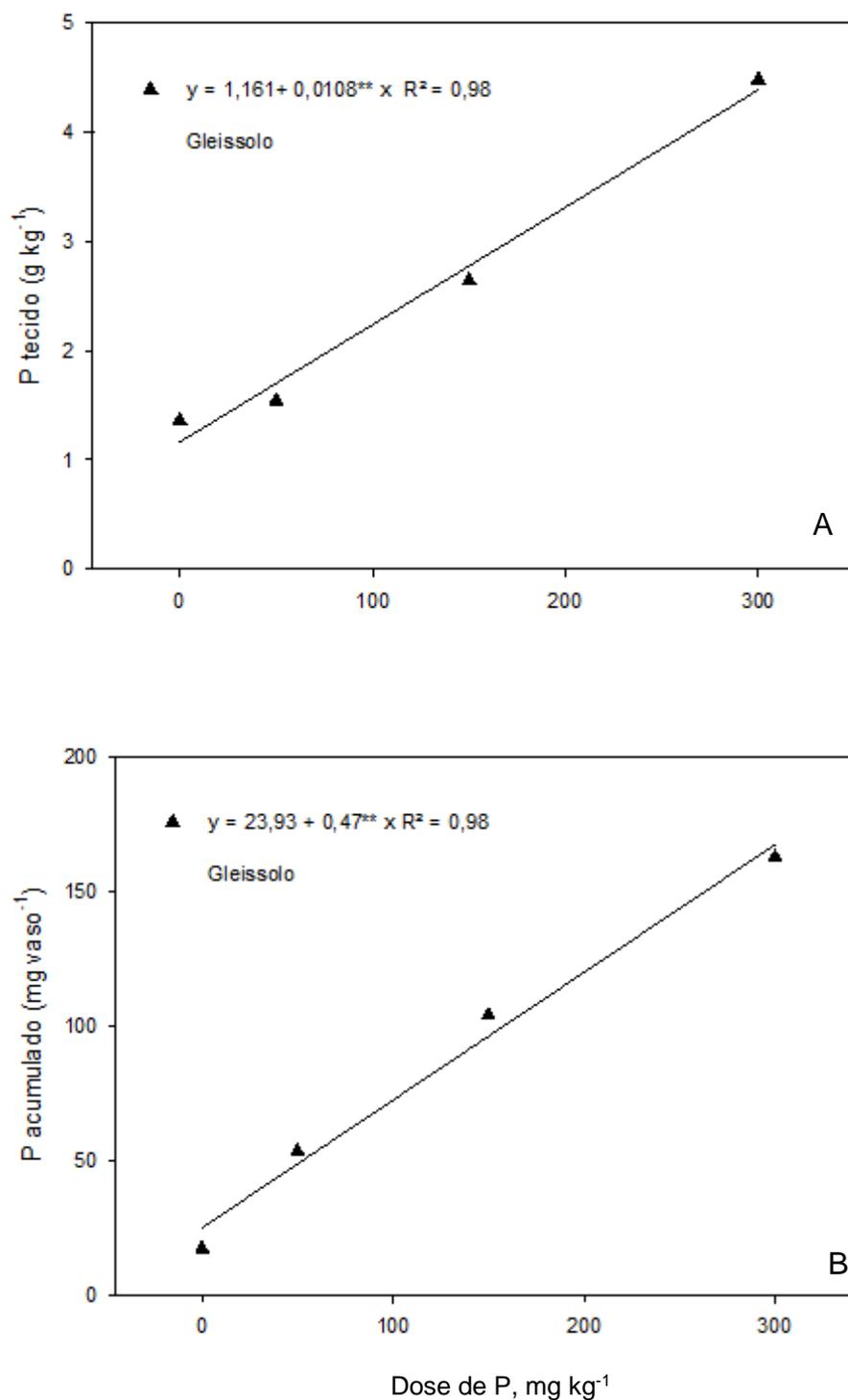
Os teores e conteúdo de fósforo na parte aérea das plantas de milho, em cinco classes de solos do Paraguai, em função de doses desse nutriente aplicadas, tanto na ausência como na presença de calagem, são apresentados na tabela 5. A absorção de fósforo, considerando tanto o teor como o conteúdo do elemento na parte aérea das plantas de milho, variou com o tipo de solo, com a dose e com a calagem, aumentando linearmente tanto com as doses de fósforo adicionadas como com os teores obtidos pelos extratores estudados, na ausência e presença de calagem, para todos os solos.

No Planossolo, houve interação entre as doses de P e a calagem nos teores e conteúdo de P na parte aérea das plantas de milho (Figura 10). A absorção e acúmulo de P com calagem e sem calagem em relação às doses adicionadas de P, especificamente na dose mais alta ( $300 \text{ mg kg}^{-1}$ ). No solo sem aplicação de calcário, 59,24 % a mais de P foi absorvido em relação ao solo com calcário, alcançando  $7,90 \text{ g kg}^{-1}$ , enquanto no solo com calcário foi de  $3,22 \text{ g kg}^{-1}$ . Porém, quando avaliado o acúmulo de P foi observado o contrário, sendo acumulado 38,3 % menos P do que no solo com calcário. O fósforo acumulado ( $\text{mg vaso}^{-1}$ ) foi de 135,23 no ambiente com calcário contra 83,43 no ambiente sem calcário.

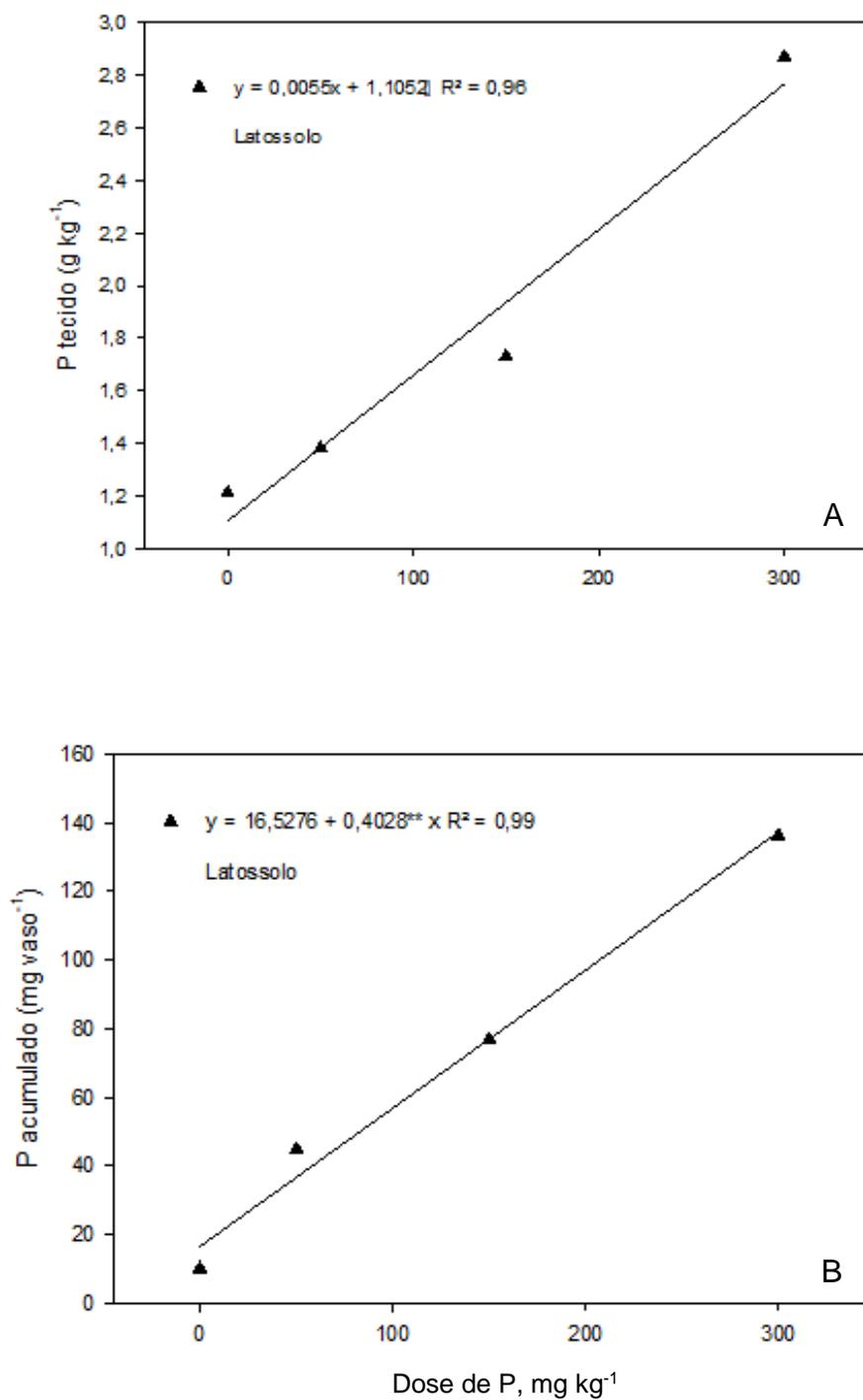
**Tabela 5.** Produção de matéria seca (PMSPA), teores e conteúdo de fósforo na parte aérea de plantas de milho, em cinco solos do Paraguai, nas quatro doses de fósforo estudadas, na ausência e presença de calagem.

Solo	Dose de P mg kg <sup>-1</sup>	PMSPA		Teores de P		Conteúdo de P	
		+Calagem	-Calagem	+Calagem	-Calagem	+Calagem	-Calagem
		---- g vaso <sup>-1</sup> ----		---- g kg <sup>-1</sup> ----		---- mg vaso <sup>-1</sup> ----	
Gleissolo	0	12,62	12,94	1,44	1,27	18,20	16,43
	50	33,38	36,08	1,53	1,54	51,08	55,65
	150	40,80	37,87	2,60	2,69	106,18	101,69
	300	36,47	36,68	4,25	4,71	155,07	172,65
Latossolo	0	10,07	5,27	1,43	1,00	14,35	5,28
	50	32,17	31,68	1,25	1,52	40,21	48,00
	150	43,12	45,12	1,75	1,70	75,56	76,58
	300	51,87	43,76	2,78	2,96	144,06	129,43
Planossolo	0	2,46	4,92	0,95	1,05	2,33	5,17
	50	28,35	34,85	1,10	1,26	31,26	43,83
	150	26,28	42,53	2,28	1,80	59,84	76,55
	300	10,60	41,93	7,90	3,22	83,65	135,01
Argissolo	0	9,61	8,82	1,15	1,20	11,05	10,61
	50	34,96	33,38	1,11	1,38	38,90	45,90
	150	42,37	40,50	2,40	2,49	101,58	100,64
	300	42,21	42,69	3,61	3,93	152,18	167,54
Nitossolo	0	22,63	17,32	1,34	1,24	30,38	21,39
	50	43,44	41,99	1,74	1,42	75,37	59,41
	150	53,16	48,30	2,01	2,42	106,85	116,64
	300	52,92	49,13	3,58	3,97	189,46	194,91

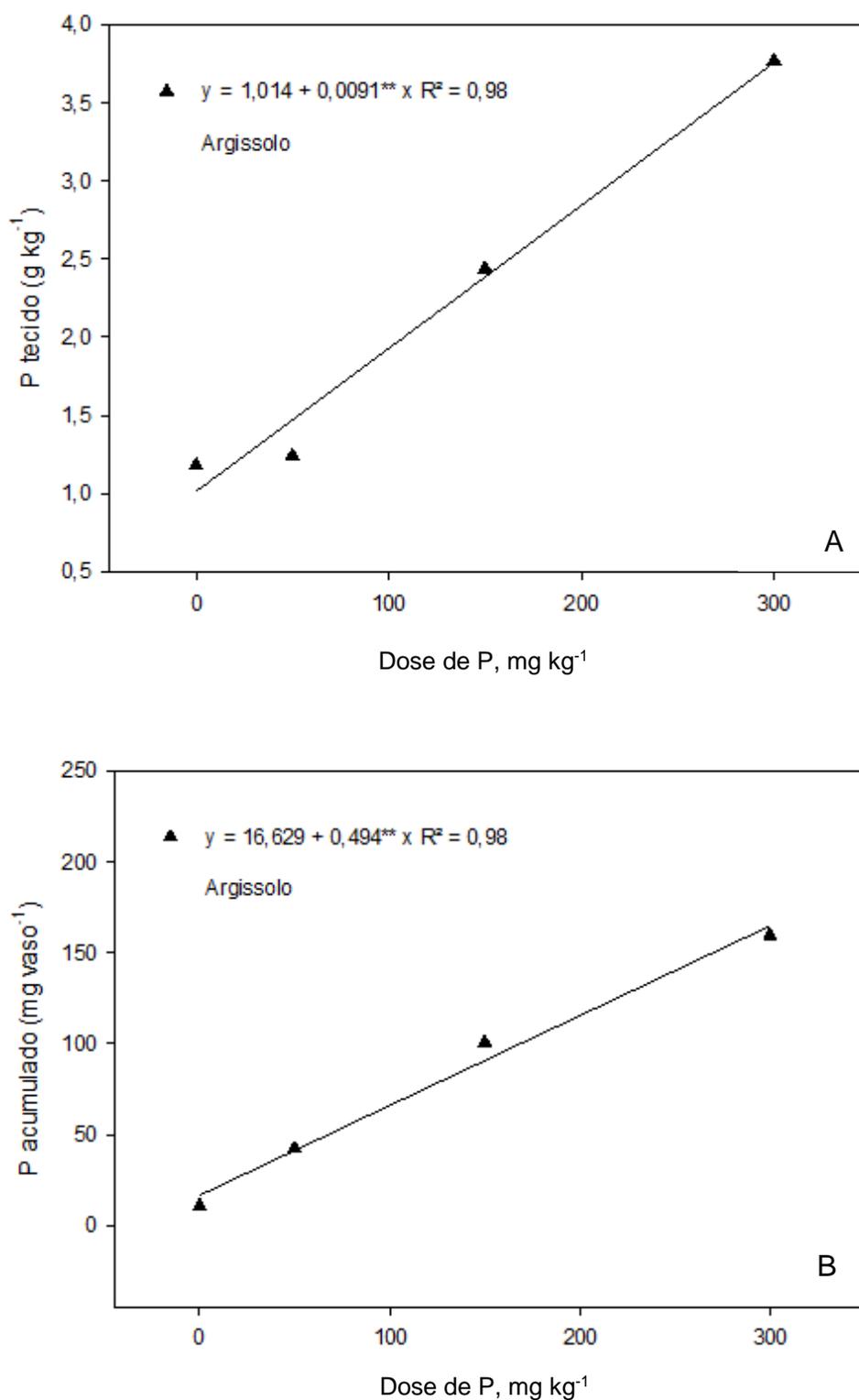
Não houve diferença significativa tanto na absorção de P na parte aérea das plantas de milho como no conteúdo acumulado nos vasos em relação as doses de P com calagem e sem calagem para o Gleissolo, Latossolo e Argissolo. As quantidades absorvidas e acumuladas de P estatisticamente foram iguais tanto no ambiente sem calagem como no ambiente com calagem em relação à cada dose. Desta forma ajustou-se, uma única equação para representar a relação entre o fósforo no tecido e o fósforo acumulado nos vasos e as doses de P adicionadas com e sem calcário (Figuras 7 a 11).



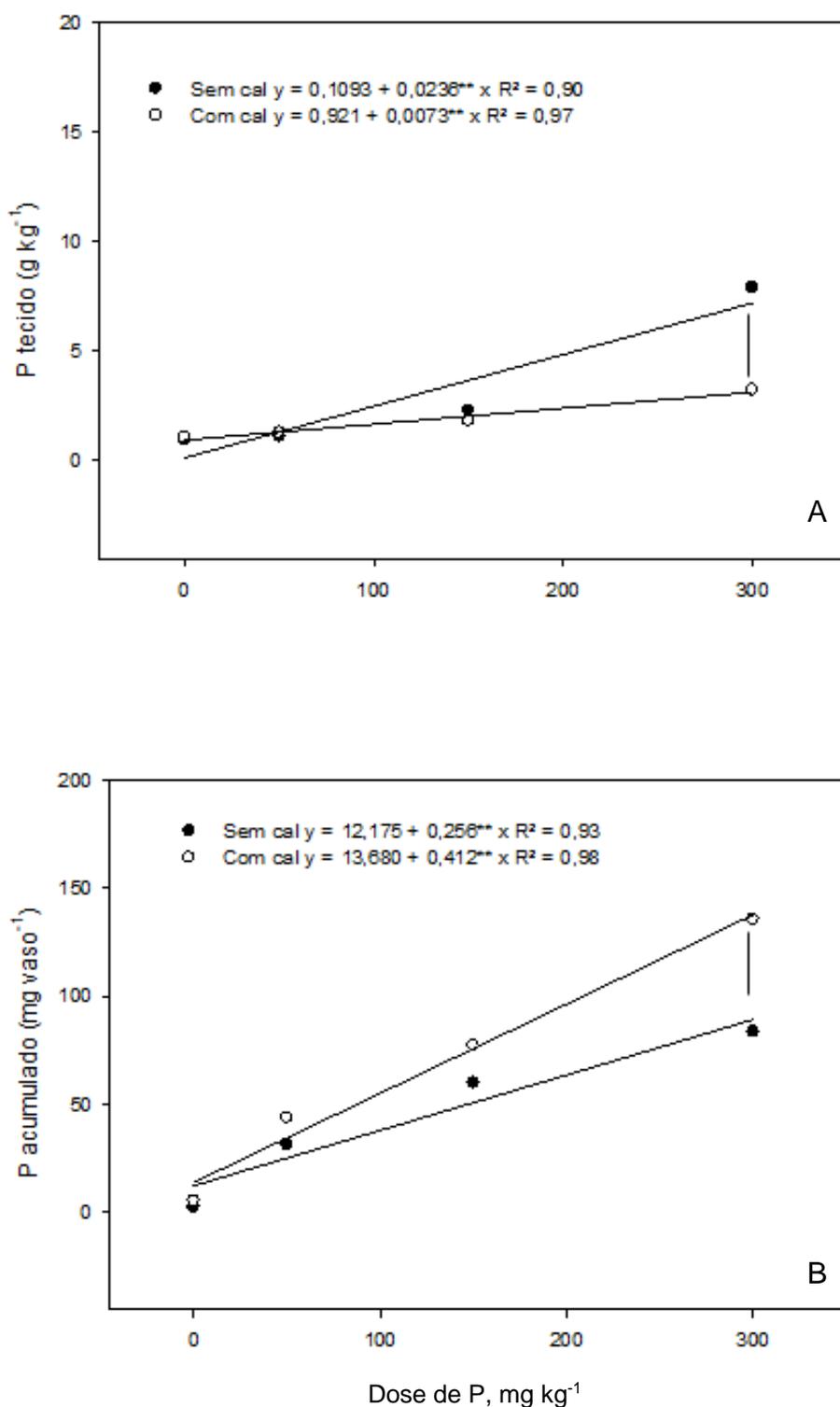
**Figura 7.** Teor de fósforo (A) e fósforo acumulado (B) na parte aérea de plantas de milho em função de doses de P, com e sem calcário, em Gleissolo. Barra vertical indica a diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de F em  $p < 0,05$ .



**Figura 8.** Teor de fósforo (A) e fósforo acumulado (B) na parte aérea de plantas de milho em função de doses de P, com e sem calcário, em Latossolo. Barra vertical indica a diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de F em  $p < 0,05$ .



**Figura 9.** Teor de fósforo (A) e fósforo acumulado (B) na parte aérea de plantas de milho em função de doses de P, com e sem calcário, em Argissolo. Barra vertical indica a diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de F em  $p < 0,05$ .

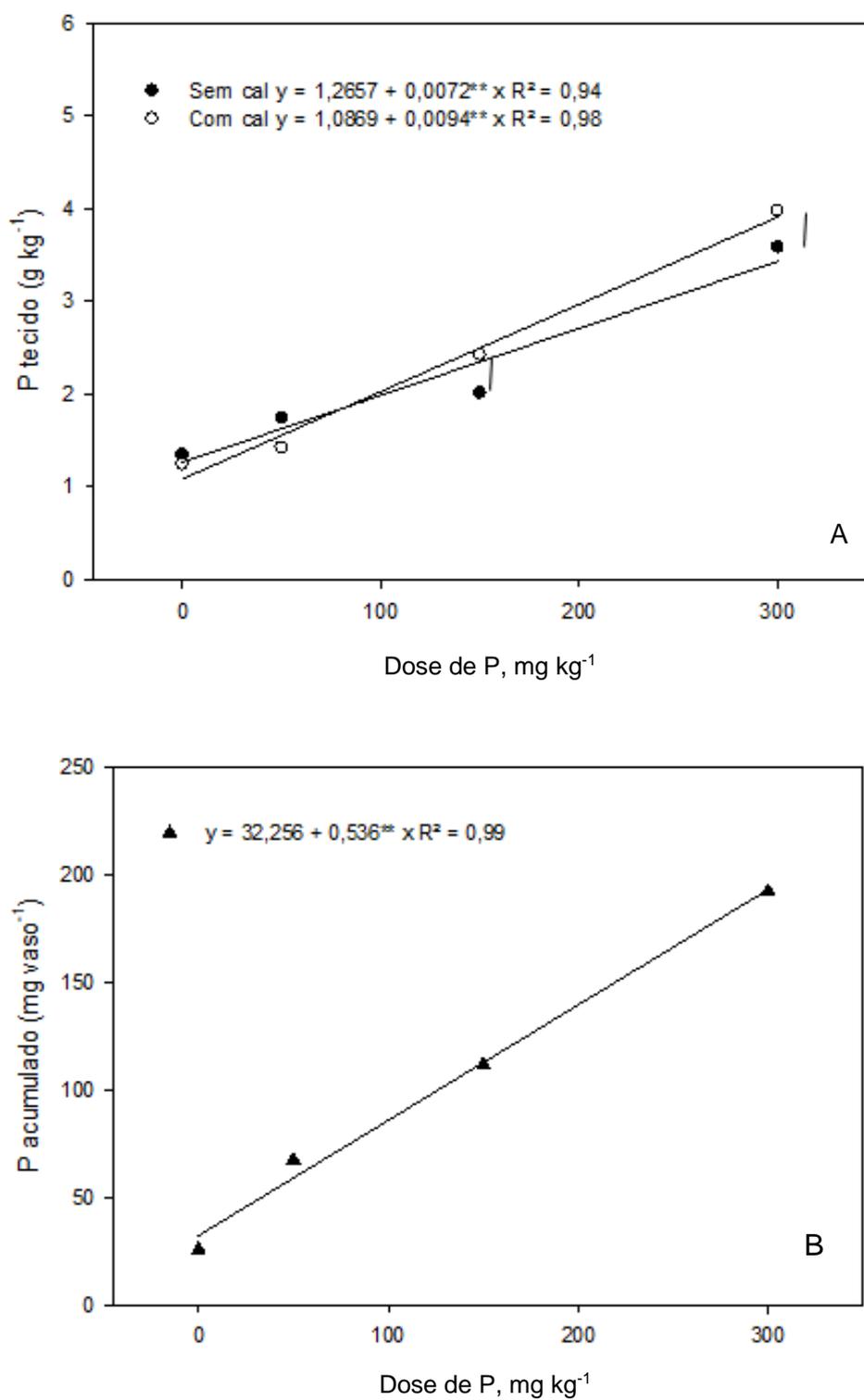


**Figura 10.** Teor de fósforo (A) e fósforo acumulado (B) na parte aérea de plantas de milho em função de doses de P, com e sem calcário, em Planossolo. Barra vertical indica a diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de F em  $p < 0,05$ .

Comportamento similar em que plantas absorveram mais P, mas foram menos eficientes em conversão desse elemento em biomassa foram observados por Fageria (1998) em feijão, Saleque et al. (1998) em arroz, Paula Neto (2014) em café e Costa et al. (2024), em cana-de-açúcar. Isso significa que a conversão de fósforo em biomassa foi menos eficiente para cada unidade adicional de P absorvido. Gatiboni (2003) também observou que a produção de biomassa apresentou comportamento quadrático, apresentando queda de produção nas maiores doses de P, influenciada pelos problemas relacionados à acidez do solo na produção de biomassa e absorção de P. Foram avaliados quinze cultivos sucessivos em casa de vegetação utilizando como plantas indicadoras milheto, aveia, milho, soja, crotalária e centeio. Devido ao efeito diluição/concentração, explicado por Jarrell e Beverly (1981), a concentração de P pode apresentar esses problemas, onde o aumento na concentração do nutriente é devido ao baixo crescimento das plantas, enquanto nas plantas com desenvolvimento maior essa concentração é diluída no tecido formado. Esse efeito poderia ser o responsável por estes resultados observados no Planossolo.

Para o Nitossolo também foi verificada Interação entre as doses de P e a presença ou ausência de calagem para os teores de P na parte aérea do milho. O fósforo absorvido pela parte aérea da planta de milho no ambiente com calcário ( $2,42 \text{ g kg}^{-1}$ ) foi 16,9 % maior em relação ao ambiente sem calcário ( $2,01 \text{ g kg}^{-1}$ ) na dose de  $150 \text{ mg kg}^{-1}$ . Na dose de  $300 \text{ mg kg}^{-1}$  essa diferença foi 9,8 % superior, mas, não observado essa interação nos conteúdos de P acumulados nas plantas. Assim, a figura 11B apresenta uma única equação para representar a relação entre o P acumulado e as doses de P adicionadas aos solos com e sem calcário.

Avaliando a disponibilidade de P no solo para milho, Bortolon et al. (2009) evidenciaram um aumento linear no P acumulado pelas plantas conforme o aumento dos seus teores no solo. Corroborando com resultados do presente trabalho para Gleissolo, Latossolo e Argissolo, Gatiboni (2003), observou em seu trabalho que o P acumulado na parte aérea de plantas em quinze cultivos apresentou comportamento linear em relação às doses desse nutriente aplicadas no solo. Esse resultado é comum em ensaios conduzidos em casa de vegetação, pois a produção de matéria seca é afetada por outros fatores ambientais, enquanto a absorção de P é, em grande parte, devida aos seus teores disponíveis no solo.



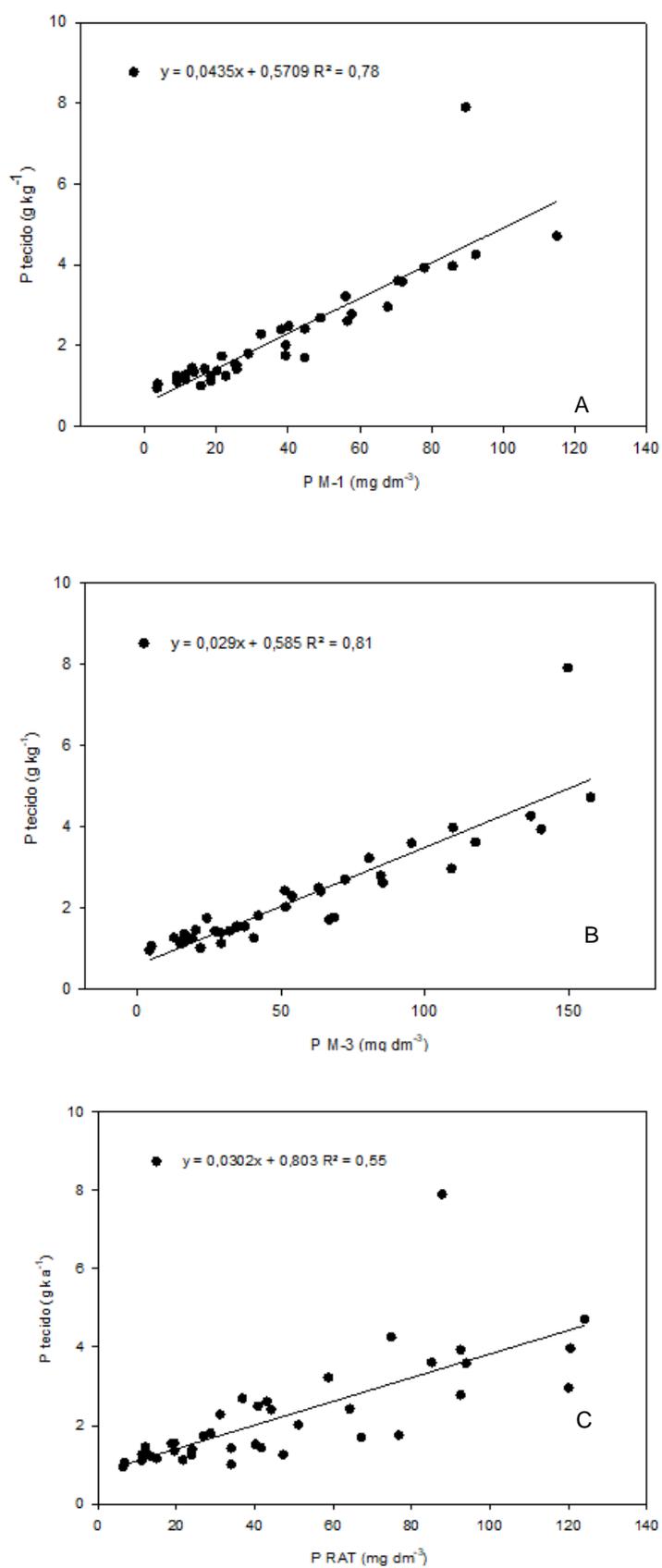
**Figura 11.** Teor de fósforo (A) e fósforo acumulado (B) na parte aérea de plantas de milho em função de doses de P com e sem calcário em Nitossolo. Barra vertical indica a diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de F em  $p < 0,05$ .

### 4.3 Correlações entre os teores de P disponível por cada extrator e o conteúdo de P na parte aérea das plantas de milho.

Foram ajustadas equações de regressão que estimam o P acumulado na parte aérea da planta como variável o teor de P do solo avaliado pelos extratores, considerando todos os solos. Na maioria dos estudos que comparam ou selecionam extratores de fósforo, é comum utilizar a correlação entre o fósforo absorvido e acumulado pela planta teste, cultivada em condições de casa de vegetação, e a quantidade de fósforo no solo extraído pelos extratores, conforme Silva e Raji (1999). Esta abordagem busca estabelecer uma relação entre a disponibilidade de fósforo no solo medida pelos extratores e a capacidade das plantas em absorver e acumular esse nutriente, proporcionando uma base para selecionar os extratores mais adequados.

O extrator M-1, considerando-se todas as unidades experimentais obteve alto grau de correlação ( $r = 0,78^{**}$ ) com a absorção de P na parte aérea das plantas de milho (Figura 12A). No caso do extrator M-3, considerando-se todas as unidades experimentais, o grau de correlação foi o maior ( $r = 0,81^{**}$ ) (Figura 12B) e para RTA, foi menor,  $r = 0,55^{**}$  (Figura 12C). Em trabalho semelhante com milho, Farias et al. (2009) obtiveram coeficientes menores quando agruparam classes de solos distintas em solos do estado da Paraíba, no Brasil, sendo  $r = 0,79$  para M-3 e  $r = 0,82$  para RTA. Isso demonstra que o coeficiente de correlação linear pode variar de acordo com a classe de solo e é importante exercer uma cautela adicional ao interpretar a eficiência dos extratores de fósforo disponível em estudos que correlacionam métodos de análise de solos. Assim, a interpretação destes resultados requer uma análise cuidadosa para garantir uma compreensão precisa da disponibilidade de P no solo e sua relação com as necessidades das plantas.

No presente estudo, quando os solos foram separados por classes, os coeficientes de correlação aumentaram para os três extratores em relação da correlação obtida com todas as unidades experimentais, conforme tabela 6.



**Figura 12.** Relação entre os teores de fósforo extraído do solo pela solução de M-1 (A) M-3 (B) RTA (C) e teores de fósforo na parte aérea das plantas de milho.

**Tabela 6.** Coeficiente de correlação linear simples entre conteúdo de P da parte aérea de plantas de milho e o teor de P disponível pelos extratores Mehlich-1, Mehlich-3 e resina trocadora de ânions nos solos com todas as doses de P com e sem calcário.

Classe de solo			
	M-1	M-3	RTA
Gleissolo	0,9838**	0,9861**	0,9209**
Latossolo	0,8993*	0,8753*	0,8892*
Planossolo	0,9078**	0,9435**	0,9015**
Argissolo	0,9826**	0,9760**	0,9670**
Nitossolo	0,9727**	0,9740**	0,9660**

, \*\* significativo a 5 e 1 % respectivamente.

Observou-se um aumento significativo na correlação para os extratores em todas as categorias, o que sugere uma maior sensibilidade desses extratores à capacidade tampão de P. Resultados semelhantes foram observados por Braida et al. (1996) durante a análise do desempenho dos extratores M-1 e RTA em dez solos no Rio Grande do Sul, com variações no teor de argila. Ao separar os solos com base no teor de argila, foram registrados coeficientes de correlação mais elevados tanto para o M-1 quanto para a RTA, embora o M-1 tenha apresentado aumentos relativos maiores. Isso respalda a decisão de classificar os solos em categorias com base em características associadas à capacidade tampão, semelhante ao que foi realizado para interpretar o teor de P pelo M-1 em solos de Minas Gerais, utilizando categorias de fósforo remanescente (P-rem) ou quantidade de argila, conforme Alvarez et al. (2000).

Os valores de coeficientes de correlação linear elevados para todos os extratores em cada classe de solos avaliadas, indicam a eficácia desses extratores em estimar a disponibilidade desse elemento para as plantas. Estes resultados sugerem que todos os extratores M1, M3 e RTA foram eficientes na previsão da quantidade de fósforo disponível para as plantas nas diferentes classes de solo avaliadas do Paraguai.

Vale ressaltar algumas particularidades de cada extrator em relação a fonte de P aplicada. Silva e Raij (1999) avaliando a eficiência de extratores de P em dois

Latossolos do Rio Grande do Sul, verificaram que a fonte de P influencia significativamente as correlações entre o P extraído por diferentes métodos e o acúmulo desse elemento na parte aérea do feijoeiro. Foram observados coeficientes de correlação consideráveis entre o fósforo extraído pelo M-1 e o fósforo acumulado na parte aérea das plantas em solos que receberam tratamentos com fosfato solúvel (superfosfato triplo) ( $r = 0,94$ ) e fosfato natural de origem sedimentar (fosfato de Gafsa) ( $r = 0,99$ ). No entanto, quando um fosfato natural de rocha ígnea (fosfato de Araxá) foi utilizado, a correlação foi menos expressiva ( $r = 0,75$ ). Possivelmente esse fato deve ter ocorrido devido ao M-1 solubilizar resíduos que não estão prontamente disponíveis para as plantas, especialmente quando se empregam fontes de baixa solubilidade como os fosfatos naturais originados de rochas ígneas como verificado por Doll et al. (1960). De acordo com Raij e Quaggio (1990), embora o pH dos extratores ácidos seja inadequado para solubilizar fosfatos de ferro e alumínio, ele é altamente favorável para a extração de fosfatos de cálcio, mesmo em formas não facilmente disponíveis.

No estudo de Silva e Raij (1999), todos os coeficientes de correlação foram altos quando foi utilizada a RTA, independentemente da fonte de P utilizada (fosfato natural de Araxá; fosfato natural de Gafsa e superfosfato triplo). Não houve correlações significativas entre o fósforo extraído pelo M-3 e as respostas das plantas nos solos tratados com fosfato natural de Araxá. Para as demais fontes de fósforo, as correlações obtidas foram as mais baixas em comparação com os outros métodos de extração.

#### **4.4 Correlações entre os teores de P disponível por cada extrator e o conteúdo acumulado de P nas plantas de milho.**

Os coeficientes de determinação entre os níveis de fósforo acumulado no vaso e os níveis de fósforo extraído pelas soluções de Mehlich-1 (Figura 13A), Mehlich-3 (Figura 13B) e resina trocadora de ânions (Figura 13C) indicam uma forte relação entre essas variáveis, levando-se em consideração a ampla faixa de teores de fósforo e a variação nas características físicas, químicas e mineralógicas dos solos estudados. As variações nessas características não afetaram a capacidade dos extratores em avaliar a disponibilidade de fósforo para as plantas, destacando a

sensibilidade e, conseqüentemente, a eficácia destes métodos em solos com diferentes texturas.

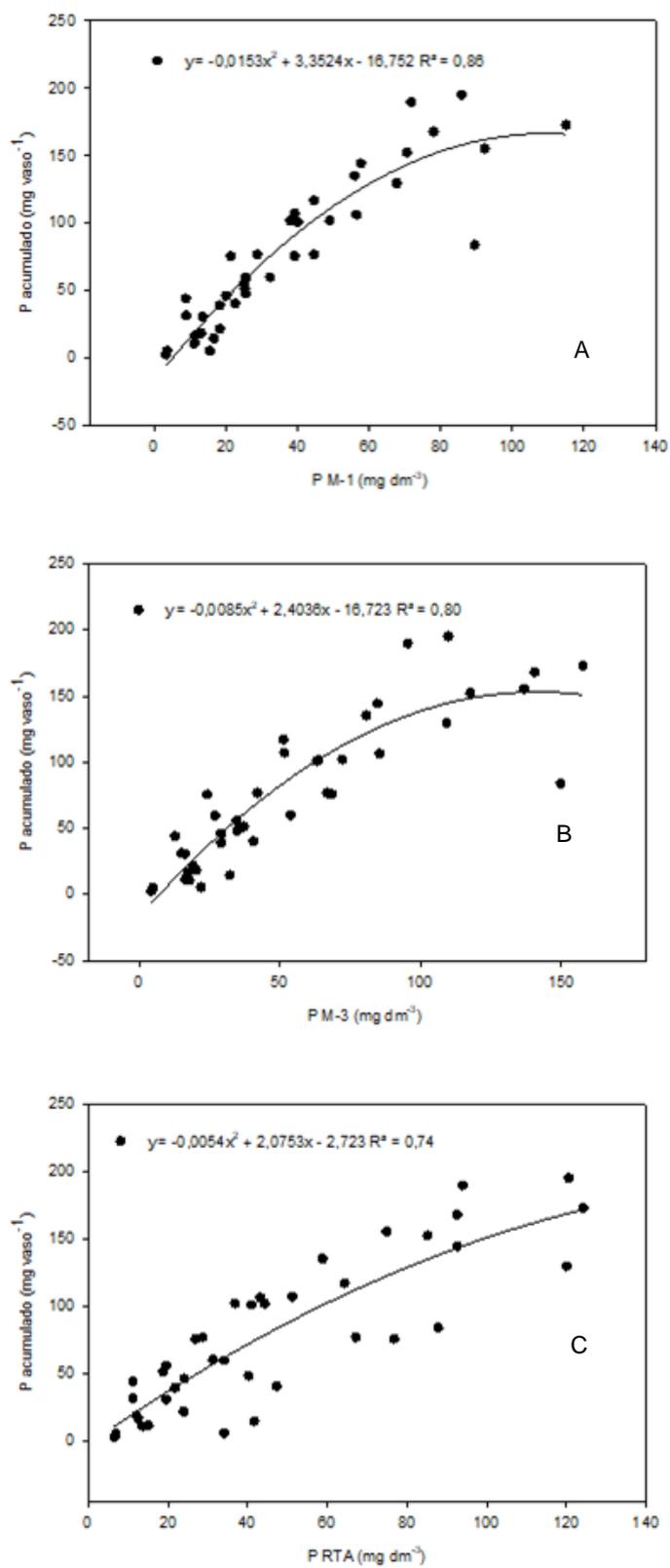
A correlação entre os teores de fósforo extraído do solo pela solução de M-1 e conteúdo de fósforo acumulado pelo milho obteve  $r = 0,86$ , considerando-se todas as unidades experimentais. No caso do M-3 o coeficiente de determinação foi de  $r = 0,80$  e da RTA  $r = 0,74$ . Bortolon et al. (2009) também verificaram essas correlações sendo do extrator M-1 com  $r = 0,88$  e M-3 com  $r = 0,91$ . Farias et al. (2009) também obtiveram coeficiente de determinação elevados, geralmente acima de 0,90 para M-1, M-3 e RTA para os doze solos estudados. Entre os solos avaliados havia Argissolo, Latossolo e Planossolo, indicando a eficiência de todos esses extratores para estimar a disponibilidade de P para as plantas.

Steiner et al. (2012) constataram que os extratores Mehlich-1, Mehlich-3 e Resina demonstraram eficácia similar na extração de P disponível em doze solos do estado do Paraná. A maior correlação entre o teor de fósforo extraído no solo com o conteúdo de fósforo nas plantas foi da RTA ( $r = 0,93$ ), seguida pelo M-3 ( $r = 0,90$ ).

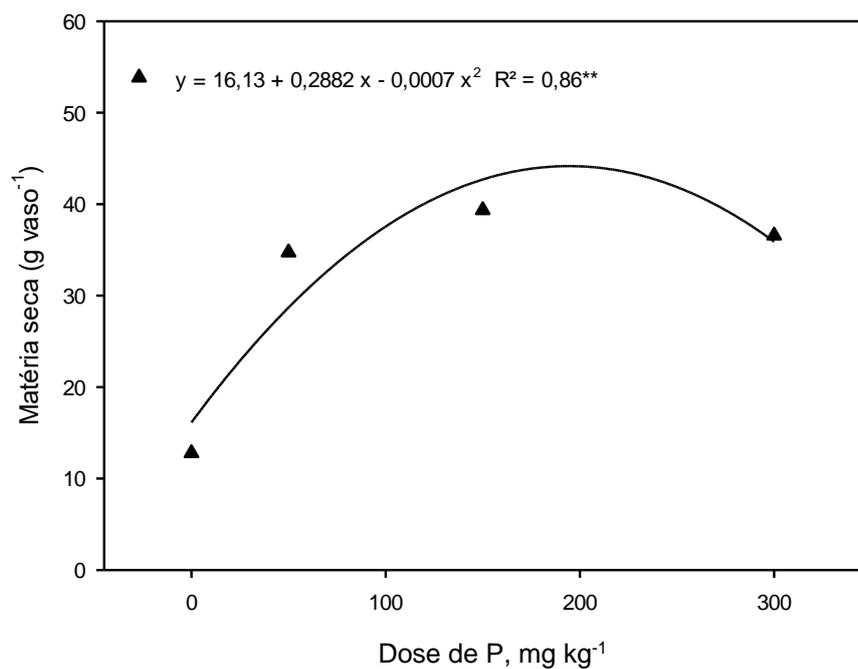
Simões Neto et al. (2009) também compararam o desempenho dos extratores Mehlich-1, Mehlich-3, e RTA na avaliação da disponibilidade de fósforo em solos representativos para o cultivo da cana-de-açúcar no Nordeste brasileiro. E, também, observaram que os teores de fósforo determinados pelos três extratores apresentaram correlação positiva com o fósforo absorvido e acumulado nos componentes da parte aérea das plantas.

#### **4.5 Produção de matéria seca em função de doses de P na ausência e presença de calcário.**

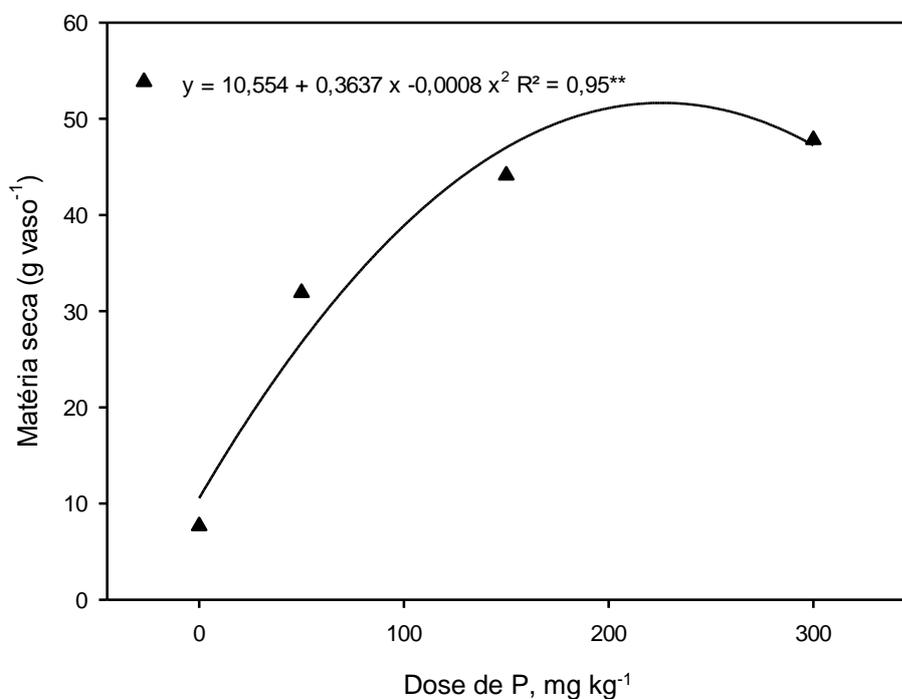
Separando-se as classes de solos, não houve diferença significativa na quantidade de matéria seca em relação as doses de P nos ambientes com calagem e sem calagem para o Gleissolo, Latossolo, Argissolo e Nitossolo. As quantidades de matéria seca foram estatisticamente iguais tanto no ambiente sem calagem como no ambiente com calagem em relação à cada dose de P. Assim, nas figuras 14, 15, 16 e 17 é apresentada única equação para representar a relação entre matéria seca da parte aéreas das plantas de milho e as doses de P adicionadas, tanto na presença quanto na ausência de calagem.



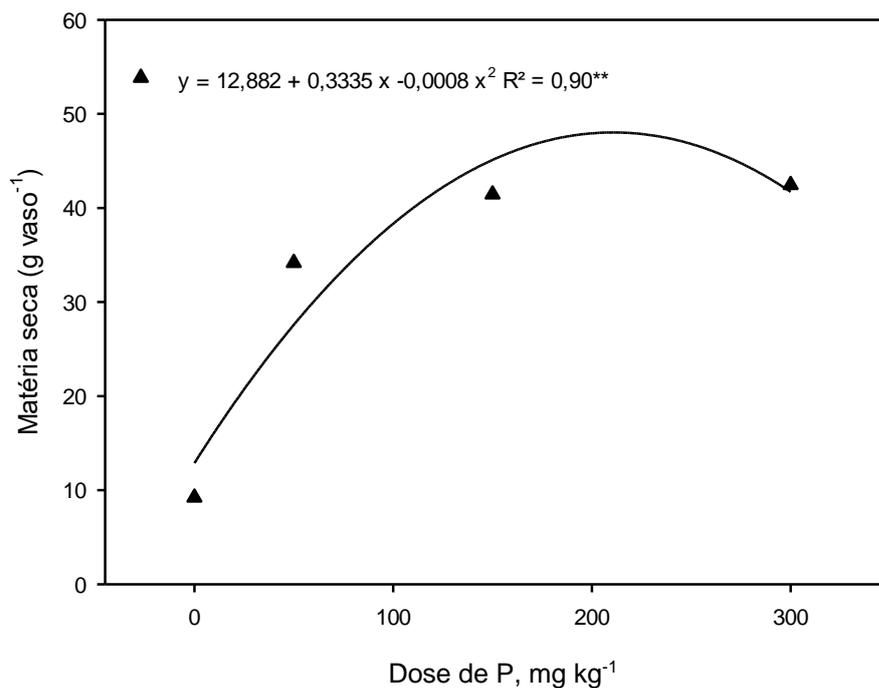
**Figura 13.** Relação entre os teores de fósforo extraídos do solo pela solução de M-1 (A) M-3 (B) RTA (C) e conteúdo de fósforo acumulado pelas plantas de milho.



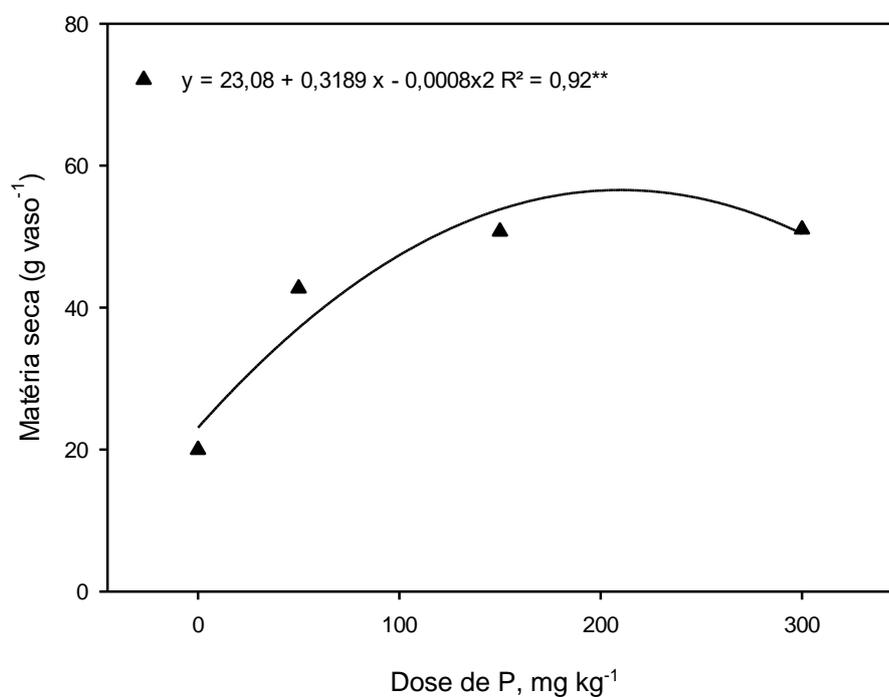
**Figura 14.** Produção de matéria seca da parte aérea das plantas de milho em função da aplicação de doses de P, na ausência e na presença de calcário em Gleissolo.



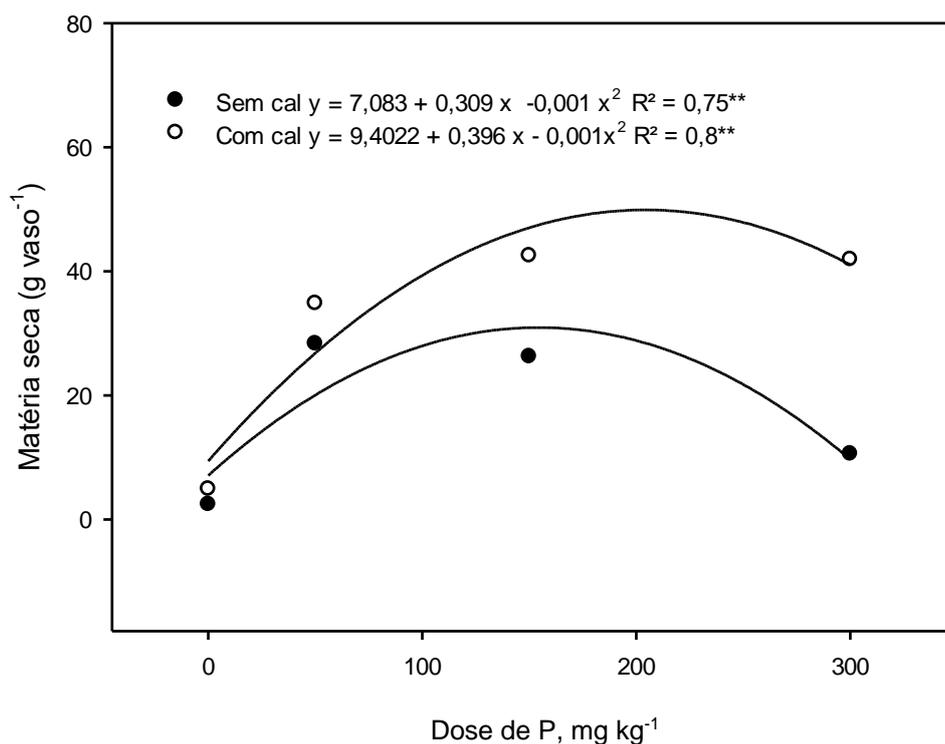
**Figura 15.** Produção de matéria seca da parte aérea das plantas de milho em função de doses de P na ausência e presença de calcário em Latossolo.



**Figura 16.** Produção de matéria seca da parte aérea das plantas de milho em função da aplicação de doses de P, na ausência e na presença de calcário em Argissolo.



**Figura 17.** Produção de matéria seca da parte aérea das plantas de milho em função da aplicação de doses de P, na ausência e na presença de calcário em Nitossolo.



**Figura 18.** Produção de matéria seca da parte aérea das plantas de milho em função da aplicação de doses de P, na ausência e na presença de calcário em Planossolo.

As equações ajustadas para a produção de matéria seca das plantas em função das doses de P aplicadas antes do cultivo independente de calagem obtiveram um alto grau coeficiente de determinação para todos os solos estudados. Resultados similares foram obtidos por Gatiboni (2003).

A maior produção de matéria seca das plantas de milho foi obtida no Nitossolo, com 51,03 g vaso<sup>-1</sup> quando a dose foi 300 mg kg<sup>-1</sup> de P (Figura 17) e a menor foi registrada no Latossolo com 7,67 g vaso<sup>-1</sup> onde não foi aplicado P e o teor de P era de 6,17 mg dm<sup>-3</sup> no solo, avaliado pelo extrator M-1 (Figura 15).

Houve diferença significativa na quantidade de matéria seca em relação as doses de P nos ambientes com calagem e sem calagem para o Planossolo, ou seja, as quantidades de matéria seca estatisticamente diferiram-se no ambiente sem calagem para o ambiente com calagem a partir da dose de 50 mg kg<sup>-1</sup> (Figura 18). Neste solo, o pH em CaCl<sub>2</sub> sem calagem, foi em média de 4,25 e no ambiente com calagem foi 4,78. Gatiboni (2003) observou baixas correlações por causa da acidez que baixou a produção de matéria seca e absorção de P nos tratamentos com maior

adição desse elemento. Isso se deve ao fato de que a correção da acidez do solo com calcário tem a capacidade de diminuir a solubilidade dos óxidos de ferro, uma vez que é a parte ativa da argila que possui cargas elétricas sensíveis ao pH. Como resultado, a capacidade de adsorção de fosfato é reduzida, o que permite uma maior eficiência na disponibilização de fósforo, conforme Novais e Smyth (1999).

#### 4.6 Níveis críticos de P no solo

Foi observada variação nos níveis críticos de P em função dos extratores (Tabela 7). Em média, os maiores níveis críticos foram obtidos com o extrator M-3 e os menores com M-1. A amplitude de variação dos níveis críticos foi de 40,08 a 66,57 mg dm<sup>-3</sup> para M-1, de 65,84 a 93,37 mg dm<sup>-3</sup> para M-3 e de 41,72 a 88,37 mg dm<sup>-3</sup> para RTA.

A ampla diversidade nos níveis críticos de fósforo encontrados pelos diferentes extratores é resultado não apenas das distintas capacidades tampão de P dos solos, mas também das disparidades na disponibilidade inicial desse elemento nos solos antes do início do cultivo.

**Tabela 7.** Níveis críticos de P no solo pelos extratores Mehlich-1, Mehlich-3 e resina trocadora de ânions para solos do Paraguai.

Solo	Nível crítico		
	Mehlich-1	Mehlich-3	Resina trocadora de ânions
	----- mg dm <sup>-3</sup> -----		
Gleissolo	66,57	93,37	68,55
Latossolo	49,21	79,57	88,37
Planossolo	40,08	65,84	41,72
Argissolo	50,42	86,45	59,27
Nitossolo	54,6	68,04	75,57
Todos solos	57,47	81,6	77,15
Média	52,18	78,65	66,70
Desvio Padrão	6,73	9,37	12,96
CV (%)	13	12	19

Em geral, os níveis críticos determinados em estudos realizados em condições de casa de vegetação, utilizando cultivo em vasos, tendem a ser mais elevados do

que aqueles obtidos em experimentos de campo, conforme Corrêa e Haag (1993). Isso ressalta a importância de conduzir experimentos de calibração em campo para estabelecer os níveis críticos e as taxas de recuperação de fósforo necessárias para definir as doses de recomendação segundo Alvarez et al. (2000). Esses experimentos de campo devem ser realizados após os estudos de correlação em casa de vegetação. A seleção cuidadosa dos solos e dos locais para os experimentos é crucial, e é necessário repetir os estudos em diferentes anos para reduzir os efeitos de variáveis que não podem ser mantidas constantes, como o clima, o que aumenta os custos associados à realização dessas pesquisas, afirmam Cantarutti et al. (2007).

Os altos níveis críticos de fósforo determinados em estudos de casa de vegetação são atribuíveis ao fato de que a dose de fósforo é aplicada ao volume total de solo. Nessas condições, os níveis críticos só seriam consistentes com aqueles obtidos no campo se a amostragem no campo fosse restrita à região da cova ou do sulco de plantio. Portanto, os níveis críticos variam dependendo do método de extração, da cultura, das propriedades do solo, bem como do método de aplicação do nutriente e da técnica de amostragem do solo, segundo Alvarez et al. (2000) e Leite et al. (2006).

Níveis críticos de P em seis solos representativos da Paraíba foram determinados por Farias et al. (2009), sendo a ordem decrescente encontrada de  $RTA > M-3 > M-1$  para solos mais intemperizados, e  $M-3 > Resina > M-1$  para solos menos intemperizados. Bonfim et al. (2003), ao determinarem os níveis críticos de fósforo em seis solos da Zona da Mata de Pernambuco, que variavam em teores de argila, constataram que os menores níveis críticos de P no solo foram observados ao utilizar o método Mehlich-1, corroborando com o presente estudo.

A amplitude dos níveis críticos pode ser observada pelos coeficientes de variação (CV %) obtidos para os três extratores, com maiores CVs para resina e M-1 e menor para o M-3, similarmente ao encontrado por Reis et al. (2020). O coeficiente de variação pode ser empregado como uma métrica para avaliar a sensibilidade dos extratores à capacidade tampão (CT) do solo. Quanto maior o CV, maior é a sensibilidade do extrator à CT. Ao calcular o CV para todos os solos, verificou-se que o extrator mais sensível, segundo este critério, foi a resina trocadora de ânions, enquanto o Mehlich-3 foi o menos sensível.

## 5. CONCLUSÕES

As soluções extratoras Mehlich-1, Mehlich-3 e resina trocadora de ânions mostraram-se eficazes na estimativa da disponibilidade de fósforo em solos do Paraguai, com altos coeficientes de correlação entre o fósforo extraído e o conteúdo de fósforo na parte aérea das plantas de milho.

A calagem influenciou a recuperação do fósforo em doses de 300 mg kg<sup>-1</sup>, sendo observada para Mehlich-3 em Latossolo e Planossolo, Mehlich-1 em Gleissolo e Planossolo, e resina trocadora de ânions em Gleissolo, Latossolo e Planossolo. No entanto, não houve efeito da calagem para Mehlich-3 em Gleissolo, Argissolo e Nitossolo, Mehlich-1 em Latossolo, Argissolo e Nitossolo, e resina trocadora de ânions em Argissolo e Nitossolo.

Os níveis críticos de fósforo, ordenados quantitativamente para os cinco solos, seguiram a sequência: Mehlich-3 > RTA > Mehlich-1.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVAREZ V., V. H.; NOVAIS, R.; DIAS, L.; OLIVEIRA, J. A. Determinação e uso do fósforo remanescente. **Boletim Informativo SBCS**, v. 25, p. 27-32, 2000.
- ANDRADE, F. V.; MENDONÇA, E. S.; ALVAREZ, V. H.; NOVAIS, R. F. Adição de ácidos orgânicos e húmicos em Latossolos e adsorção de fosfato. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 6, p. 1003-1011, 2003.
- ANTELO, J.; ARCE, F.; AVENA, M.; FIOL, S.; LÓPEZ, R.; MACÍAS, F. Adsorption of a soil humic acid at the surface of goethite and its competitive interaction with phosphate. **Geoderma**, v. 138, n. 1, p. 12-19, 2007.
- ANTONIADIS, V.; HATZIS, F.; BACHTSEVANIDIS, D.; KOUTROUBAS, S. D. Phosphorus availability in low-P and acidic soils as affected by liming and P addition. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 46, n. 10, p. 1288-1298, 2015.
- BARBIERI, D. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; ALLEONI, L. R. F.; GARBUIO, F. J.; CAMARGO, L. A. Hillslope curvature, clay mineralogy, and phosphorus adsorption in an Alfisol cultivated with sugarcane. **Scientia Agricola**, v. 66, n. 6, p. 819-826, 2009.
- BARBIERI, D. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; LA SCALA JR., N.; SIQUEIRA, D. S.; PANOSSO, A. R. Comportamento dos óxidos de ferro da fração argila e do fósforo adsorvido, em diferentes sistemas de colheita de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 6, p. 1557-1568, 2013.
- BARBOSA, N. C.; ARRUDA, E. M.; BROD, E.; PEREIRA, H. S. Distribuição vertical do fósforo no solo em função dos modos de aplicação. **Bioscience Journal**, v. 31, n. 1, p. 87-95, 2015.
- BARRON, V.; HERRUZO, M.; TORRENT, J. Phosphate adsorption by aluminous hematites of different dhapes. **Soil Science Society of America Journal**, v. 52, n. 3, p. 647-651, 1988.
- BARROW, N. J. Reaction of anions and cations with variable - charge soils. **Advances in Agronomy**, v. 38, p. 183-230, 1985.
- BECKETT, P. H. T.; WHITE, R. E. Studies on the phosphate potentials of soils: part III: the pool of labile inorganic phosphate. **Plant and Soil**, v. 21, n. 3, p. 253-282, 1964.
- BIGHAM, J. M.; GOLDEN, D. C.; BUOL, S. W.; WEED, S. B.; BOWEN, L. H. Iron oxide mineralogy of well-drained ultisols and oxisols: II. influence on color, surface area, and phosphate retention. **Soil Science Society of America Journal**, v. 42, n. 5, p. 825-830, 1978.
- BISSANI, C.; TEDESCO, M.; CAMARGO, F.; MIOLA, G. Anion exchange resins and iron oxide-impregnated filter paper as plant available phosphorus indicators in soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 33, p. 1119-1130, 2002.

BONFIM, E. M. D. S.; FREIRE, F. J.; SANTOS, M. V. F. D.; SILVA, T. J. A. D.; FREIRE, M. B. D. S. Avaliação de extratores para determinação de fósforo disponível de solos cultivados com *Brachiaria brizantha*. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 25, n. 2, p. 323-328, 2003.

BORTOLON, L.; GIANELLO, C. Interpretação de resultados analíticos de fósforo pelos extratores Mehlich-1 e Mehlich-3 em solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 2751-2756, 2008.

BORTOLON, L.; GIANELLO, C.; SCHLINDWEIN, J. A. Avaliação da disponibilidade de fósforo no solo para o milho pelos métodos Mehlich-1 e Mehlich-3. **Scientia Agraria**, v. 10, n. 4, p. 305-312, 2009.

BORTOLUZZI, E. C.; PEREZ, C. A.; ARDISSON, J. D.; TIECHER, T.; CANER, L. Occurrence of iron and aluminum sesquioxides and their implications for the P sorption in subtropical soils. **Applied Clay Science**, v. 104, p. 196-204, 2015.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **The nature and properties of soils**. Fifteenth edition. Columbus: Pearson, 2016. 912 p.

BRAIDA, J. A.; CAMARGO, F. de O.; ROSSO, I. J.; GIANELLO, C.; MEURER, E. J. Comparação de métodos de determinação da disponibilidade de fósforo do solo para as plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 20, n. 2, p. 345-347, 1996.

BRASIL, E. C.; MURAOKA, T. Extratores de fósforo em solos da Amazônia tratados com fertilizantes fosfatados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 21, n. 4, p. 599-606, 1997.

CAMARGO, M. S.; BARBOSA, D. S.; RESENDE, R. H.; KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S. Fósforo em solos de cerrado submetidos à calagem. **Bioscience Journal**, v. 26, n. 2, p. 187-194, 2010.

CAMARGO, L. A.; MARQUES, J.; BARRÓN, V.; ALLEONI, L. R. F.; BARBOSA, R. S.; PEREIRA, G. T. Mapping of clay, iron oxide and adsorbed phosphate in Oxisols using diffuse reflectance spectroscopy. **Geoderma**, v. 251-252, p. 124-132, 2015.

CAMARGO, L. A.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; HORVAT, R. A. Variabilidade espacial de atributos mineralógicos de um latossolo sob diferentes formas do relevo: II - correlação espacial entre mineralogia e agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 6, p. 2279-2288, 2008.

CANTARUTTI, R. B.; BARROS, N. F.; MARTINEZ, H. E. P.; NOVAIS, R. F. Avaliação da fertilidade do solo e recomendação de fertilizantes. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 769-850.

CARMO, C. A. F. S.; ARAUJO, W. S.; BERNARDI, A. C. C.; SALDANHA, M. F. C. **Métodos de análise de tecidos vegetais utilizados na Embrapa Solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2000. 41p. (Circular Técnica, 6).

CORRALES, R. A. F. **Avaliação e calibração de extratores de fósforo em três diferentes ordens de solo da Costa Rica** [Dissertação]. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luis de Queiroz”, 2013. 100p.

CORRÊA, L. A.; HAAG, H. P. Disponibilidade de fósforo pelos extratores de Mehlich 1 e Resina em Latossolo Vermelho Amarelo, álico cultivado com três gramíneas forrageiras. **Scientia Agricola**, v. 50, n. 2, p. 287–294, 1993.

COSTA, D. B.; FREIRE, F. J.; LEMOS, J. D. O.; SILVA, S. R. V. D.; BEZERRA, N. S.; ANDRADE, P. K. B. D.; ANDRADE, J. J. D. Phosphorous availability in Argisols and sufficiency range in sugarcane in the Northeast of Brazil. **Revista Ciência Agronômica**, v. 55, 2024. Disponível em: <http://periodicos.ufc.br/revistacienciaagronomica/article/view/91988>. Acesso em: 31 jul. 2024.

DALAL, R. C.; HALLSWORTH, E. G. Evaluation of the parameters of soil phosphorus availability factors in predicting yield response and phosphorus uptake. **Soil Science Society of America Journal**, v. 40, n. 4, p. 541-546, 1976.

DAMON, P. M.; BOWDEN, B.; ROSE, T.; RENGEL, Z. Crop residue contributions to phosphorus pools in agricultural soils: A review. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 74, p. 127-137, 2014.

DOLL, E. C.; MILLER, H. F.; FREEMAN, J. F. Initial and residual effects of rock phosphate and superphosphate<sup>1</sup>. **Agronomy Journal**, v. 52, n. 5, p. 247-250, 1960.

DYER, B. On the analytical determination of probably available “mineral” plant food in soils. **Transactions of the Chemical Society**, v. 65, p. 115-167, 1894.

FAGERIA, N. K. Eficiência de uso de fósforo pelos genótipos de feijão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 2, n. 2, p. 128-131, 1998.

FALCÃO, N. P. de S.; SILVA, J. R. A. da. Características de adsorção de fósforo em alguns solos da Amazônia Central. **Acta Amazonica**, v. 34, n. 3, p. 337-342, 2004.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. World fertilizer trends and outlook to 2018. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**, 2015. 53 p.

FARDEAU, J. C. Dynamics of phosphate in soils. An isotopic outlook. **Fertilizer Research**, v. 45, n. 2, p. 91-100, 1995.

FARIAS, D. R. de; OLIVEIRA, F. H. T. de; SANTOS, D.; ARRUDA, J. A. de; HOFFMANN, R. B.; NOVAIS, R. F. Fósforo em solos representativos do estado da Paraíba: II- disponibilidade de fósforo para plantas de milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 3, p. 633-646, 2009.

FINK, J. R.; INDA, A. V; BAVARESCO, J.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; BAYER, C. Adsorption and desorption of phosphorus in subtropical soils as affected by management system and mineralogy. **Soil and Tillage Research**, v. 155, p. 62-68, 2016b.

FIXEN, P. E.; GROVE, J. H. Testing soils for phosphorus. In.: WESTERMAN, R. L. (Ed.) **Soil Testing and plant analysis**, 3rd ed. Madison, 199. Soil Science Society of America, 1990. p.141-180.

FONTES, M. P. F.; WEED, S. B. Phosphate adsorption by clays from Brazilian Oxisols: relationships with specific surface area and mineralogy. **Geoderma**, v. 72, n. 1, p. 37-51, 1996.

FORNASARI, C. H.; ZANÃO JÚNIOR, L. A.; DAMACENO, F. M.; GARCIA, Y. J. A. Estimate of potential acidity using the pH SMP method in soils in the west Paraguay. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 55, n. 3, p. 1-9, 2023.

FRANCHINI, J.; DEBIASI, H.; BALBINOT JUNIOR, A.; TONON, B.; FARIAS, J.; OLIVEIRA, M. N.; TORRES, E. Evolution of crop yields in different tillage and cropping systems over two decades in southern Brazil. **Field Crops Research**, v. 137, p. 178-185, 2012.

FREITAS, I. F.; NOVAIS, R. F.; VILLANI, E. M. A.; NOVAIS, S. V. Phosphorus extracted by ion exchange resins and mehlich-1 from oxisols (latosols) treated with different phosphorus rates and sources for varied soil-source contact periods. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 3, p. 667-677, 2013.

GATIBONI, L. C. **Disponibilidade de formas de fósforo do solo às plantas**. 2003. 231f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J.; SANTOS, D. R. Modificações nas formas de fósforo do solo após extrações sucessivas com Mehlich-1, Mehlich-3 e resina trocadora de ânions. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 3, p. 363–371, 2005.

GONÇALVES, G. K.; MEURER, E. J.; BORTOLON, L.; GONÇALVES, D. R. N. Relação entre óxidos de ferro e de manganês e a sorção de fósforo em solos no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 5, p. 1633-1639, 2011.

GOROSTIAGA, O. L.; ERICO, E. G.; LLAMAS, P. A.; MOLINAS, A. S.; FRANCO, E. S.; GARCÍA, S.; RIOS, E. Estudio de reconocimiento de suelos. Capacidad de uso de la tierra y propuesta de ordenamiento territorial preliminar de la región oriental del Paraguay. **Gobierno Del Paraguay - Ministerio de Agricultura y Ganadería**, v. 1, p. 246, 1995.

GUNARY, D.; SUTTON, C. D. Soil factors affecting plant uptake of phosphate. **Journal of Soil Science**, v. 18, n. 1, p. 167-173, 1967.

HAYNES, R. J. Lime and phosphate in the soil-plant system. **Advances in Agronomy**, v. 37, p. 249-315, 1984.

JARRELL, W. M.; BEVERLY, R. B. JARRELL, W. M.; BEVERLY, R. B. The dilution effect in plant nutrition studies. **Advances in Agronomy**, v. 34, p. 197-224, 1981.

JARVIE, H. P.; SHARPLEY, A. N.; FLATEN, D.; KLEINMAN, P. J. A.; JENKINS, A.; SIMMONS, T. The pivotal role of phosphorus in a resilient water-energy-food security nexus. **Journal of Environmental Quality**, v. 44, n. 4, p. 1049-1062, 2015.

KARIM, M. I.; ADAMS, W. A. Relationships between sesquioxides, kaolinite, and phosphate sorption in a catena of oxisols in Malawi. **Soil Science Society of America Journal**, v. 48, n. 2, p. 406-409, 1984.

KASSAM, A.; FRIEDRICH, T.; DERPSCHE, R. Global spread of conservation agriculture. **International Journal of Environmental Studies**, v. 76, n. 1, p. 29-51, 2019.

KER, J. C. Latossolos do Brasil: uma revisão. **Geonomos**, v. 5, n. 1, p. 17-40, 1995.

LARSEN, S. Soil phosphorus. **Advances in Agronomy**, v. 19, p. 151-210, 1967.

LARSEN, S. The use of P<sup>32</sup> in studies on the uptake of phosphorus by plants. **Plant and Soil**, v. 4, n. 1, p. 1-10, 1952.

LEITE, P. B.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; NEVES, J. C. L.; GUARÇONI M., A. Níveis críticos de fósforo, para milho, em casa de vegetação, de acordo com a sua localização no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 3, p. 497-508, 2006.

MCAULIFFE, C.; HALL, N.; DEAN, L.; HENDRICKS, S. Exchange Reactions Between Phosphates and Soils: Hydroxylic Surfaces of Soil Minerals<sup>1</sup>. **Soil Science Society of America Journal - SSSAJ**, v. 12, 1948.

MEHLICH, A. Mehlich 3 soil test extractant: a modification of Mehlich 2 extractant. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 15, n. 12, p. 1409-1416, 1984.

MELLO, J. W. V.; RIBEIRO, A. C.; ALVAREZ V., V. H.; NOVAIS, R. F. Calagem e adubação fosfatada para o arroz em solos inundados: II. disponibilidade de fósforo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 4, p. 855-862, 1999.

MIRANDA, L. N.; AZEVEDO, J. A.; MIRANDA, J. C. C.; GOMES, A. C. Calibração de métodos de análise de fósforo e resposta do feijão ao fósforo no sulco. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 11, p. 1621-1627, 2002.

MISSONG, A.; BOL, R.; NISCHWITZ, V.; KRÜGER, J.; LANG, F.; SIEMENS, J.; KLUMPP, E. Phosphorus in water dispersible-colloids of forest soil profiles. **Plant and Soil**, v. 427, n. 1, p. 71-86, 2018.

MOREIRA, M. G. **Prognóstico Cultura Soja - Dezembro de 2020**. Departamento de Economia Rural – DERAL, 2020. Disponível em: [https://www.agricultura.pr.gov.br/sites/default/arquivos\\_restritos/files/documento/2020-12/Prognostico%20Soja%20-%202020\\_21.pdf](https://www.agricultura.pr.gov.br/sites/default/arquivos_restritos/files/documento/2020-12/Prognostico%20Soja%20-%202020_21.pdf).

MOTTA, P. E. F.; CURI, N.; SIQUEIRA, J. O.; VAN RAIJ, B.; FURTINI NETO, A. E.; LIMA, J. M. Adsorption and forms of phosphorus in latosols: influence of mineralogy and use. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 2, p. 349-359, 2002.

MUNIZ, A. S. **Efeito da reação do solo na disponibilidade de fósforo em Latossolo Roxo, avaliada por extratores químicos e por plantas de arroz.** 1995. 146 f. Tese de Doutorado - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz 1995.

MURAOKA, T. Extratores de fósforo em solos da Amazônia tratados com fertilizantes fosfatados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 21, n. 4, p. 599-606, 1997.

NACHTERGAELE, F. Soil taxonom-a basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys: Second edition, by Soil Survey Staff, 1999, USDA–NRCS, Agriculture Handbook number 436, Hardbound. **Geoderma**, v. 99, p. 336–337, 2001.

NEGASSA, W.; LEINWEBER, P. How does the Hedley sequential phosphorus fractionation reflect impacts of land use and management on soil phosphorus: A review. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 172, n. 3, p. 305-325, 2009.

NOLLA, A.; ALVES, E. O. S.; SILVA, T. G.; BORDIN, A. V. Correção da acidez e disponibilização de fósforo e potássio em latossolo vermelho distrófico típico submetido à calagem incorporada e superficial **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 3, n. 3, p. 2478-2487, 2020.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais.** Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 1999. 399 p.

OJEKANMI, A.; IGE, D.; HAO, X.; AKINREMI, O. Phosphorus mobility in a soil with long term manure application. **Journal of Agricultural Science**, v. 3, n. 3, p. 25-38, 2011.

OLSEN, S. R.; KHASAWNEH, F. E. Use and limitations of physical-chemical criteria for assessing the status of phosphorus in soils. In: KHASAWNEH, F. E.; SAMPLES, E. C; KAMPRATH, E. J. (Eds.) **The role of phosphorus in agriculture.** New Jersey, NY: Wiley Online Library, 1980. p. 361-410.

PARAGUAY. **Panorama del mercado mundial y regional de la soja.** Asuncion: Ministério da Agricultura y Ganadería, 2021. Disponível em: <https://informacionpublica.paraguay.gov.py/public/2493934-PanoramaCommoditiesAgrcolasDGPIFJul2022pdf->

PAULA NETO, A. **Eficiência de uso de fósforo por cultivares de café e adaptação morfológica do sistema radicular sob deficiência do nutriente.** 2014. 97 f. - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2014.

RAIJ, B. Van; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais.** Campinas, Instituto Agronômico de Campinas, 2001. 285 p.

RAIJ, B. Van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; PROCHNOW, L. I.; VITTI, G. C.; PEREIRA, H. S. Soil testing and plant analysis in Brazil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 25, p. 739-751, 1994.

RAIJ, B. Van; QUAGGIO, J. A. Extractable phosphorus availability indexes as affected by liming. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 21, p. 1267-1276, 1990.

RAIJ, B. Van; QUAGGIO, J. A.; SILVA, N. M. Extraction of phosphorus, potassium, calcium, and magnesium from soils by an ion-exchange resin procedure. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 17, n. 5, p. 547-566, 1986

REIS, J. V. D.; ALVAREZ V., V. H.; DURIGAN, R. D.; PAULUCIO, R. B.; CANTARUTTI, R. B. Interpretation of soil phosphorus availability by mehlich-3 in soils with contrasting phosphorus buffering capacity. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 44, p. 1-21, 2020.

RODRIGUES, M.; PAVINATO, P. S.; WITHERS, P. J. A.; TELES, A. P. B.; HERRERA, W. F. B. Legacy phosphorus and no tillage agriculture in tropical oxisols of the Brazilian Savanna. **Science of the Total Environment**, v. 542, p. 1050-1061, 2016.

ROLIM NETO, F. C.; SCHAEFER, C. E. G. R.; COSTA, L. M.; CORRÊA, M. M.; FERNANDES FILHO, E. I.; IBRAIMO, M. M. Adsorção de fósforo, superfície específica e atributos mineralógicos em solos desenvolvidos de rochas vulcânicas do Alto Paranaíba (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 6, p. 953-964, 2004.

ROY, E. D.; RICHARDS, P. D.; MARTINELLI, L. A.; COLETTA, L. D.; LINS, S. R. M.; VAZQUEZ, F. F.; WILLIG, E.; SPERA, S. A.; VANWEY, L. K.; PORDER, S. The phosphorus cost of agricultural intensification in the tropics. **Nature Plants**, v. 2, n. 5, p. 16043, 2016.

SALEQUE, M. A.; ABEDIN, M. J.; PANAUULLAH, G. M.; BHUIYAN, N. I. Yield and phosphorus efficiency of some lowland rice varieties at different levels of soil-available phosphorus. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 29, p. 2905-2916, 1998.

SANDIM, A. S.; BÜLL, L. T.; FURIM, A. R.; LIMA, G. S.; GARCIA, J. L. N. Phosphorus availability in oxidic soils treated with lime and silicate applications. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 4, p. 1215-1222, 2014.

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

SBCS/NEPAR. **Manual de adubação e calagem para o Estado do Paraná**. Curitiba: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo-Núcleo Estadual Paraná. 482 p.

SCHLINDWEIN, J. A.; BORTOLON, L.; GIANELLO, C. Calibração de métodos de extração de potássio em solos cultivados sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 5, p. 1669-1677, 2011.

SHEN, J.; YUAN, L.; ZHANG, J.; LI, H.; BAI, Z.; CHEN, X.; ZHANG, W.; ZHANG, F. Phosphorus dynamics: from soil to plant. **Plant Physiology**, v. 156, n. 3, p. 997-1005, 2011.

SILVA, F. C. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. - Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica. 2009. 627 p.

SILVA, F. C.; RAIJ, B. van. Disponibilidade de fósforo em solos avaliada por diferentes extratores. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, n. 2, p. 267-288, 1999.

SIMÕES NETO, D. E.; OLIVEIRA, A. C.; FREIRE, F. J.; FREIRE, M. B. G. S.; NASCIMENTO, C. W. A.; ROCHA, A. T. Extração de fósforo em solos cultivados com cana-de-açúcar e suas relações com a capacidade tampão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, p. 840-848, 2009.

SIMONETE, M. A.; ERNANI, P. R.; MORO, L.; TEIXEIRA-GANDRA, C. F. A.; GATIBONI, L. C. Eficiência de métodos analíticos na predição da disponibilidade de fósforo para arroz irrigado em solos catarinenses. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 4, p. 1151-1160, 2015.

SOBRAL, L. F.; SILVEIRA, K. R.; VIANA, R. D. **Correlações entre os métodos Mehlich 1, Mehlich 3 e resina para análise de P e K em solos dos Tabuleiros Costeiros**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros. 2008. 16 p.

STEINER, F.; LANA, M. C.; ZOZ, T.; FRANDOLOSO, J. F.; FEY, R. Extraction methods and availability of phosphorus for soybean in soils from Paraná State, Brazil. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 33, n. 3, p. 1005-1014, 2012.

TEIXEIRA, P. C.; TEIXEIRA, W. G.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A. **Manual de métodos de análise de solos**. 2. ed. Brasília - DF: Embrapa, 2017. 574 p.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. **Phosphate rock**. Mineral Commodity Summaries, January 2022. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022-phosphate.pdf>

VALLADARES, G. S.; PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. C. Adsorção de fósforo em solos de argila de atividade baixa. **Bragantia**, v. 62, n. 1, p. 111-118, 2003.

VIÉGAS, R. A.; NOVAIS, R. F.; SCHULTHAIS, F. Disponibilidade de fósforo de uma fonte solúvel aplicada em amostras de solos com diferentes níveis de acidez. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 4, p. 1125-1136, 2010.

WILD, A. Soluble phosphate in soil and uptake by plants. **Nature**, v. 203, p. 326-327, 1964.

WITHERS, P. J. A.; RODRIGUES, M.; SOLTANGHEISI, A.; DE CARVALHO, T. S.; GUILHERME, L. R. G.; BENITES, V. M.; GATIBONI, L. C.; DE SOUSA, D. M. G.; NUNES, R. S.; ROSOLEM, C. A.; ANDREOTE, F. D.; OLIVEIRA, A.; COUTINHO, E. L. M.; PAVINATO, P. S. Transitions to sustainable management of phosphorus in Brazilian agriculture. **Scientific Reports**, v. 8, p. 2537, 2018. Disponível em: <https://europepmc.org/backend/ptpmcrender.fcgi?accid=PMC5803245&blobtype=pdf>.

ZOZ, T.; LANA, M. do C.; STEINER, F.; FRANDOLOSO, J. F.; FEY, R. Influência do pH do solo e de fertilizantes fosfatados sobre a adsorção de fósforo em Latossolo Vermelho. **Synergismus scyentifica UTFPR**, v. 4, p.1-4, 2009. Disponível em: <https://revistas.utfpr.edu.br/pb/index.php/SysScy/article/view/579>.