UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL
***CAMPUS* CERRO LARGO**
CURSO DE AGRONOMIA

KAUANY SMIT RODRIGUES

POTENCIAL DO EXTRATOR MEHLICH-3 NA AVALIAÇÃO DA DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO EM SOLOS DA REGIÃO NOROESTE DO RIO GRANDE DO SUL

CERRO LARGO
2025

KAUANY SMIT RODRIGUES

POTENCIAL DO EXTRATOR MEHLICH-3 NA AVALIAÇÃO DA DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO EM SOLOS DA REGIÃO NOROESTE DO RIO GRANDE DO SUL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Agronomia da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Agronomia.

Orientador: Prof. Dr. Renan Costa Beber Vieira

CERRO LARGO

2025

Bibliotecas da Universidade Federal da Fronteira Sul - UFFS

Rodrigues, Kauany Smit
POTENCIAL DO EXTRATOR MEHLICH-3 NA AVALIAÇÃO DA DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO EM SOLOS DA REGIÃO NOROESTE DO RIO GRANDE DO SUL / Kauany Smit Rodrigues. -- 2025.
38 f.:il.

Orientador: Prof. Dr. Renan Costa Beber Vieira

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal da Fronteira Sul, Curso de Bacharelado em Agronomia, Cerro Largo,RS, 2025.

1. Fertilidade do Solo; Fósforo Disponível; Mehlich-1; Capacidade Tampão; Análise de Solo.. I. Vieira, Renan Costa Beber, orient. II. Universidade Federal da Fronteira Sul. III. Título.

Elaborada pelo sistema de Geração Automática de Ficha de Identificação da Obra pela UFFS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

POTENCIAL DO EXTRATOR MEHLICH-3 NA AVALIAÇÃO DA DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO DE SOLOS DA REGIÃO NOROESTE DO RIO GRANDE DO SUL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Agronomia da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Agronomia.

Este trabalho foi defendido e aprovado pela banca em 27/11/2025.

BANCA EXAMINADORA

gov.br Documento assinado digitalmente
RENAN COSTA BEBER VIEIRA
Data: 11/12/2025 21:56:07-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof.º Dr. Renan Costa Beber Vieira – UFFS

Orientador

gov.br Documento assinado digitalmente
GEAN JOSE KOSLOWSKI BARBOSA
Data: 08/12/2025 14:39:35-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Eng. Agr. Gean José Koslowski Barbosa

gov.br Documento assinado digitalmente
DOUGLAS RODRIGO KAISER
Data: 11/12/2025 13:50:17-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof.º Dr. Douglas Rodrigo Kaiser

Deus nos concede, a cada dia, uma página de vida nova no livro do tempo. Aquilo que colocarmos nela, é lá que nos compete.

Augusto Cury

AGRADECIMENTOS

Chegar até aqui representa muito mais que a conclusão de uma graduação; é o símbolo de uma jornada de resistência e superação. Foram anos de luta contra adversidades que muitas vezes ameaçaram me fazer desistir, mas que, superadas, me tornaram a pessoa mais forte.

Agradeço primeiramente a Deus, pela força que encontrei na fé quando minha própria força se esgotava. Pelos dias em que a saúde mental foi minha maior batalha, e pela luz que permitiu enxergar além da ansiedade e da depressão.

À minha família, que mesmo sem compreender os desafios de uma formação superior, sempre me incentivou a estudar. Ao meu pai Leandro, minha madrasta Silvia, minha mãe Gisiane e minha avó Tereza, obrigada pelos sacrifícios silenciosos que permitiram que eu chegasse até aqui. Se hoje cheguei aqui, é porque estive sempre sustentada por seus ombros e por suas orações. Aos meus irmãos Bruno, Samuel, Otávio e Lauren; pelos momentos de alegria que traziam leveza durante esta jornada.

Ao meu namorado Anderson, meu grande companheiro. Obrigada por toda a paciência, compreensão e pelo incentivo constante. Sua presença foi um farol de tranquilidade e alegria nesta trajetória. Às minhas amigas Bruna, Dionéia e Mikaele, companheiras que fizeram parte do dia a dia na universidade e da vida além dela, que sempre estiveram comigo tanto nos momentos de alegria quanto nos momentos de aflição. Agradeço profundamente pelas risadas compartilhadas, pelos mateadas terapêuticas à tardinha e por toda a cumplicidade. Vocês tornaram essa caminhada mais e feliz.

Aos professores que foram faróis neste caminho: ao meu orientador Renan, pela paciência e sabedoria que nortearam este trabalho; à professora Juliane, pelos conselhos que iam além da sala de aula; e ao professor Sidinei, que me deu minha primeira oportunidade na iniciação científica e acreditou em meu potencial quando eu mesma não enxergava.

Por fim, minha gratidão eterna à Universidade Federal da Fronteira Sul. Esta instituição não me deu apenas uma formação - me deu um futuro. Como estudante de origem humilde, testemunho que o ensino público é o mais poderoso instrumento de transformação social. Aqui não apenas adquiri conhecimento técnico, mas descobri minha voz e meu lugar no mundo.

Esta conquista não é apenas minha, é de todos que acreditam que a educação pode mudar destinos. Aos que, como eu, travam batalhas silenciosas: persistam. O êxito, embora demore, chega para os que insistem.

RESUMO

A análise de solo é uma ferramenta essencial para o manejo eficiente da fertilidade na agricultura, onde o fósforo destaca-se como um nutriente crítico devido à sua baixa disponibilidade nos solos, especialmente em solos oxídicos intemperizados. Na região Sul do Brasil, o extrator Mehlich-1 é tradicionalmente utilizado, mas alterações químicas nos solos, decorrentes do manejo agrícola, têm limitado sua eficácia preditiva. Neste cenário, o extrator Mehlich-3 surge como uma alternativa multielementar promissora. Este trabalho objetivou avaliar o potencial do M-3 para estimar a disponibilidade de P em solos da região Noroeste do Rio Grande do Sul. Foram utilizadas 45 amostras de oito solos, incubadas com seis doses de P_2O_5 (0, 40, 80, 160, 240 e 480 kg ha^{-1}). Os teores de P disponível foram determinados por M-1 e M-3. Os resultados demonstraram uma correlação positiva e altamente significativa entre os extratores (r = 0,94**). Contudo, em média, o M-3 extraiu 41% menos P que o M-1, com a diferença sendo mais pronunciada em solos da Classe 2 de argila (410-600 g dm^{-3}). A Capacidade Tampão de Fósforo (CTP) determinada via M-3 variou amplamente (47,2 a 270,3 kg ha^{-1} de P_2O_5) e correlacionou-se positivamente com o teor de argila (r=0,64), embora outros fatores, como mineralogia e teor de matéria orgânica, também tenham influenciado. Verificou-se ainda uma forte correlação (R^2=0,9352) entre os valores de CTP obtidos por M-1 e M-3, com uma relação de conversão de $M_3 = 0,59\ M_1$. Conclui-se que o M-3 possui alto potencial para substituir o M-1 na região, desde que a interpretação dos resultados considere o teor de argila do solo e sejam aplicadas equações de conversão calibradas localmente, permitindo assim aproveitar a extensa base de calibração existente para o M-1 e as vantagens operacionais do método multielementar.

Palavras-chave: Fertilidade do Solo; Fósforo Disponível; Mehlich-1; Capacidade Tampão; Análise de Solo.

ABSTRACT

Soil analysis is an essential tool for the efficient management of soil fertility in agriculture, with phosphorus (P) standing out as a critical nutrient due to its low availability in soils, especially in those with high contents of iron and aluminum oxides. In Southern Brazil, the Mehlich-1 extractor is traditionally used; however, chemical changes in soils resulting from agricultural management have limited its predictive effectiveness. In this scenario, the Mehlich-3 extractor emerges as a promising multi-element alternative. This study aimed to evaluate the potential of M-3 to estimate P availability in soils from the Northwest region of Rio Grande do Sul. A total of 45 samples from eight soils were used, incubated with six rates of P_2O_5 (0, 40, 80, 160, 240 e 480 kg ha^{-1}). The available P content was determined by M-1 and M-3. The results demonstrated a positive and highly significant correlation between the extractors ($r = 0.94$). However, on average, M-3 extracted 41% less P than M-1, with the difference being more pronounced in Class 2 clay soils (410-600 g dm^{-3}). The Phosphorus Buffering Capacity (PBC) determined via M-3 varied widely (47.2 to 270.3 kg ha^{-1} of P_2O_5) and was positively correlated with clay content ($r=0.64$), although other factors, such as mineralogy and organic matter content, also exerted an influence. A strong correlation ($R^2=0.9352$) was also found between the PBC values obtained by M-1 and M-3, with a conversion relationship of $M_3 = 0.59\ M_1$. It is concluded that M-3 has high potential to replace M-1 in the region, provided that the interpretation of results considers the soil clay content and that locally calibrated conversion equations are applied. This would allow for leveraging the extensive existing calibration database for M-1 and the operational advantages of the multi-element method.

Keywords: Soil Fertility; Available Phosphorus; Mehlich-1; Buffering Capacity; Soil Analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Distribuição espacial dos 8 solos da região noroeste do estado do Rio Grande do Sul selecionados para o experimento. 23
Figura 2: Correlação entre os teores de P extraído pelas soluções de Mehlich-1 e de Mehlich-3 em 8 solos do Noroeste do Rio Grande do Sul. 27
Figura 3: Correlação entre os teores de P extraído pelas soluções de Mehlich-1 e de Mehlich-3 para as classes de argila 410 a 600 g dm-3 (a) e > 600 g dm-3 (b). 29
Figura 4: Teores de P extraídos por Mehlich-3 em solos incubados com seis doses de P2O5, agrupados nas Classes 1 e 2, em ordem decrescente de argila. 29
Figura 5: Dispersão dos teores de argila do solo e a Capacidade Tampão de Fósforo (CTP) dos solos analisados por solução Mehlich-3 31
Figura 6: Correlação entre a CTP obtida pelas soluções de Mehlich-1 e de Mehlich-3. 33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Caracterização textural e atributos químicos dos 8 solos selecionados na região noroeste do RS. 25
Tabela 2: Amplitude dos valores de pH, teores de argila e P extraídos pelas soluções de Mehlich-1 e de Mehlich-3. 28
Tabela 3: Teores de fósforo extraídos por Mehlich-1 em função das doses de P2O5 aplicadas e os valores de Capacidade Tampão de Fósforo (CTP) correspondentes. 32

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Ca – Cálcio

CTC – Capacidade de troca de cátions

CTP – Capacidade tampão de fósforo

Cu – Cobre

EDTA – Ácido etilenodiaminotetracético

Fe – Ferro

HCl – Ácido clorídrico

HNO_3 – Ácido nítrico

H_2SO_4 – Ácido sulfúrico

I – Fator intensidade

ICP-OES – Espectrometria de emissão óptica com plasma induzido

K – Potássio

M-1 – Mehlich-1

M-3 – Mehlich-3

Mg – Magnésio

Mn – Manganês

Na – Sódio

P – Fósforo

P-Ca – Fósforo associado ao cálcio

P-lábi – Fósforo lábil

Pi – Fósforo inorgânico

Pm – Fósforo contido na biomassa microbiana do solo

Po – Fósforo orgânico

Q – Fator quantidade

RNA – Resina trocadora de ânions

RS – Rio Grande do Sul

SC – Santa Catarina

TSM – Teor de matéria seca

UFFS – Universidade Federal da Fronteira Sul

Zn – Zinco

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 12
2 OBJETIVOS 14
2.1 OBJETIVO GERAL 14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 14
3 REVISÃO DE LITERATURA 15
3.1 FERTILIDADE DO SOLO 15
3.2 FÓSFORO NO SOLO 16
3.3 AVALIAÇÃO DO FÓSFORO DISPONÍVEL 18
3.4 EXTRAÇÃO DE FÓSFORO POR MEHLICH-1 20
3.5 EXTRAÇÃO DE FÓSFORO POR MEHLICH-3 21
4 MATERIAL E MÉTODOS 23
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO 27
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS 34
REFERÊNCIAS 35

1 INTRODUÇÃO

A avaliação da fertilidade do solo através da análise de solo é uma ferramenta fundamental na agricultura permitindo conhecer os teores de nutrientes e de elementos tóxicos presentes no solo. Com base nessas informações, é possível realizar aplicações adequadas de corretivos e fertilizantes, de acordo com a produtividade esperada de cada cultura. Esse manejo racional e assertivo, resulta em maiores retornos econômicos e contribui para a preservação dos recursos naturais, como o solo e a biodiversidade.

O fósforo (P) é um nutriente essencial para o crescimento e desenvolvimento das plantas. No entanto, sua disponibilidade no solo é frequentemente limitada devido à alta adsorção em formas pouco disponíveis, especialmente em solos com altos teores de óxidos de ferro e alumínio, características comuns nos solos brasileiros intemperizados.

Existem diversos extratores para a avaliação da disponibilidade de P no solo, sendo o Mehlich-1 (M-1) amplamente empregado na região Sul do Brasil. No entanto, nas últimas décadas, o uso intensivo de insumos agrícolas, como fertilizantes, calcário e fosfatos naturais promoveu o acúmulo de formas de fósforo associadas ao cálcio (P-Ca), além de elevar a capacidade de troca de cátions (CTC) e reduzir a acidez do solo. Essas alterações nas características químicas dos solos têm contribuído para a limitação da capacidade preditiva do extrator M-1 na estimativa do P disponível para as plantas (Reis, 2016).

Nesse cenário, o extrator Mehlich-3 (M-3) surge como uma proposta promissora, por ser um método multielementar, capaz de extrair simultaneamente Fósforo (P), Potássio (K), Sódio (Na), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Manganês (Mn), Zinco (Zn) e Cobre (Cu) em um mesmo extrato, o que representa baixo custo, facilidade de execução e rapidez. Sua aplicação vem sendo estudada em diferentes regiões do país e do mundo, mas ainda há lacunas quanto à sua eficácia em contextos edafoclimáticos específicos, como os solos do Noroeste do Rio Grande do Sul, que apresentam grande variabilidade em textura e mineralogia (Mehlich, 1984; Bortolon *et al.*, 2009)

Estudos apontam alta correlação entre os métodos M-1 e M-3 na estimativa da disponibilidade de P no solo, embora apresentem divergências quanto à quantidade extraída, especialmente em função do teor de argila. Nos solos do estado de Santa Catarina, Mumbach *et al.* (2018) observaram que o M-3 extraiu, em média, 12% mais P que o M-1, mas ambos foram influenciados pela textura do solo. Já em solos do Rio

Grande do Sul, Bortolon *et al.* (2009) constataram que o M-3 extraiu de 50% a 150% mais P que o M-1 em solos arenosos, mas menos em solos argilosos. Esses resultados reforçam a necessidade de calibração local e interpretação ajustada, considerando a maior sensibilidade do M-3 às variações dos solos (Silva *et al*., 1999; Bortolon et al., 2009).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o potencial do extrator Mehlich-3 na estimativa da disponibilidade de fósforo em solos da região Noroeste do Rio Grande do Sul.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar a correlação entre os teores de fósforo extraídos pelos métodos Mehlich-1 e Mehlich-3 em solos da região Noroeste do Rio Grande do Sul.
- Estimar a capacidade tampão de P (Mehlich-3) de solos submetidos as doses de adubação fosfatada.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 FERTILIDADE DO SOLO

O solo é a parte superficial intemperizada da crosta terrestre, não consolidada, e que contém matéria orgânica e seres vivos. Nele, as plantas se desenvolvem, obtendo água e nutrientes através das raízes (Raij, 1981).

Um solo fértil é aquele que contém todos os nutrientes em quantidades equilibradas e em formas disponíveis para absorção pelas plantas (Ronquim, 2020). Além disso, deve estar livre de elementos tóxicos e apresentar boas condições físicas e químicas. Para garantir a produtividade, é fundamental que o solo esteja em um ambiente com clima adequado, oferecendo umidade, nutrientes e estrutura favorável ao desenvolvimento das raízes das plantas cultivadas.

O solo podem ser naturalmente fértil, ou tornar-se fértil com maior ou menor restrição (tamponamento) a essa mudança, por meio da adição de fertilizantes (Novais *et al.*, 2007). No entanto, solos férteis podem perder essa qualidade devido a um manejo inadequado. Por isso, é fundamental adotar práticas de conservação e manejo sustentável para a manutenção da fertilidade ao longo do tempo (Ronquim, 2020).

Os nutrientes são diretamente influenciados pelos fenômenos químicos, físicos e biológicos que ocorrem no solo, os quais podem aumentar ou diminuir sua disponibilidade. Assim, a fertilidade do solo visa compreender as propriedades químicas que impactam a produção das culturas e buscar métodos para alterá-las, buscando produtividade (Raij, 1981).

O diagnóstico da fertilidade do solo é feito por meio da análise de solo, que envolve amostragem, quantificação de elementos e classificação em faixas de teores conforme a expectativa de rendimento das culturas. Seu objetivo é avaliar a disponibilidade de nutrientes essenciais e identificar possíveis elementos tóxicos (Tiecher, 2016).

Manejar a fertilidade de forma correta visa alinhar bons resultados econômicos com a preservação dos recursos naturais do solo e do meio ambiente. Para isso, é fundamental respeitar as particularidades de cada solo e fornecer soluções específicas. (Raij, 2019).

3.2 FÓSFORO NO SOLO

O (P) é um nutriente que possui alta interação com a fase sólida do solo, e essa característica, associada à sua deficiência natural em solos brasileiros, torna esse elemento um dos mais críticos na prática de adubação. Apesar da deficiência do nutriente ter sido reduzida nos últimos anos, em função da utilização de fertilizantes minerais e calagem, ainda há graus de deficiência muito variáveis devido às características particulares de cada tipo de solo, o que dificulta a recomendação de doses de P a serem aplicadas (Raij, 2019).

A principal fonte de P no solo é a apatita, um mineral que ao intemperizar-se libera o elemento para a solução. O P pode formar diversos compostos, incluindo os ortofosfatos (HPO_4^{2-} e $H_2PO_4^-$), que são as formas absorvíveis pelas raízes das plantas. Normalmente, esses compostos são solúveis e estão presentes em pequenas quantidades dissolvidas na solução do solo (Lopes,1995).

Para melhor compreensão, o P no solo é dividido em dois grandes grupos, fósforo orgânico (Po) e fósforo inorgânico (Pi), de acordo com a natureza do composto ao qual está ligado (Gatiboni *et al.*, 2008).

O Po representa uma fração significativa do P total do solo, podendo variar entre 5 e 80%. Essa fração é influenciada por fatores como: atividade biológica, temperatura, umidade, disponibilidade de substrato para os microrganismos e o próprio teor de P do solo. Oriundo dos resíduos vegetais, dos tecidos microbianos e nos produtos oriundos da decomposição deles. Entre as formas de Po conhecidas, destacam-se os fosfatos de Inositol, os fosfolipídios, os ácidos nucleicos e outros ésteres fosfato. A estabilidade desses compostos é dependente de sua natureza e interação com a fração mineral, uma vez que são utilizados como fontes de carbono e energia por microrganismos, resultando na mineralização e liberação do P (Santos *et al.*, 2008; Rheinheimer *et al*., 2020).

Essa fração pode ser dividida em grupos conforme a estrutura química dos compostos. O maior grupo (80 % do Po total do solo) é formado pelos fosfatos monoéster, compostos de baixa disponibilidade às plantas devido a suas altas cargas residuais e alta reatividade com os colóides inorgânicos do solo. Os fosfatos orgânicos diéster (10% do Po total do solo), são representados por polifosfonatos e fosfonatos, que possuem baixa persistência no solo por serem cadeias carbonadas de fácil decomposição microbiana. O terceiro grupo refere-se ao P contido na biomassa microbiana do solo (Pm), que pode ser

obtido da solução do solo ou ser mineralizado a partir de compostos orgânicos e posteriormente imobilizado nas células microbianas. Sendo assim, a mineralização dos fosfatos diéster e a ciclagem do P contido na biomassa microbiana do solo são os responsáveis pela oferta de P da fração Po às plantas (Santos *et al.*, 2008).

Já o Pi pode ser dividido em duas frações principais: o P presente em minerais primários e o P adsorvido. Ele compõe um grupo complexo de fosfatos inorgânicos, formando diferentes compostos de variados graus de estabilidade química, podendo estar ligados a grupos funcionais como silanol e aluminol nas bordas de argilas silicatadas, aos grupos R-OH de oxihidróxidos de ferro e alumínio, e até mesmo à matéria orgânica do solo por meio de pontes de cátions. Os principais fatores responsáveis pela adsorção em solos de regiões tropicais e subtropicais são óxidos de ferro mal cristalizados, a quantidade de alumínio substituindo ferro, óxidos bem cristalizados e caulinita. A intensidade com que ocorre a adsorção está diretamente relacionada à presença e à quantidade de constituintes do solo capazes de reter moléculas, sejam elas eletricamente neutras ou carregadas. (Santos *et al.*, 2008; Rheinheimer; Anghinoni; Conte, 2003).

O fosfato pode ser adsorvido aos colóides do solo por meio de diferentes tipos de ligações, que variam em força e reversibilidade. As ligações monodentadas, envolvendo um oxigênio do fosfato com o metal do colóide, são comuns nas bordas de argilas silicatadas e oxihidróxidos compactos como a hematita. Já as bidentadas, nas quais dois oxigênios do fosfato se ligam ao mesmo metal do colóide, ocorrem com maior frequência em oxihidróxidos de alumínio (Al) e ferro(Fe) com maior área superficial específica.Existe também a ligação binucleada, onde dois oxigênios se ligam a dois átomos do metal do colóide. A energia de ligação aumenta da ligação monodentada para a binucleada, reduzindo a dessorção do P. Com o tempo, pode ocorrer o envelhecimento ou oclusão do fósforo adsorvido, o que dificulta ainda mais a dessorção (Gatiboni *et al.*, 2012).

O pH do solo influencia na formação de compostos de baixa solubilidade, como fosfatos de Fe, Al e Ca, sendo a predominância de cada forma dependente da disponibilidade desses cátions. Em solos ácidos, prevalecem os fosfatos de ferro; com a elevação do pH, há uma redução dessas formas e um aumento das formas ligadas ao alumínio. Em pH próximo ao ideal para a maioria das culturas, normalmente observa-se a maior disponibilidade de P. Já em condições alcalinas, o P passa a se associar ao Ca, formando fosfatos de Ca (Pinto, 2012).

A dessorção, ou seja, a liberação do P previamente adsorvido aos colóides do solo, depende da proporção de ocupação dos sítios de adsorção e de fatores que influenciam a energia de ligação entre o P e os constituintes do solo (Rheinheimer, *et al.*, 2003).

O pH mais elevado favorece a dessorção, aumentando a concentração de P disponível na solução do solo. No entanto, em pH alcalino, a precipitação com Ca volta a reduzir a disponibilidade por limitar a dessorção (Gustafsson *et al.*, 2012).

De modo geral, a disponibilidade, a possibilidade de mineralização e o aproveitamento do nutriente pelas plantas são representados em graus de labilidade de Po e Pi, classificado por três "pools": lábil, moderadamente lábil e pouco lábil (Rheinheimer *et al*., 2020; Gatiboni *et al.*, 2008).

O P-lábil refere-se às formas em equilíbrio rápido com a solução do solo, sendo geralmente adsorvido às cargas eletropositivas do solo, sobretudo em minerais como óxidos de ferro e alumínio, onde predominam cargas dependentes do pH. Esse tipo de adsorção é classificado como não específica ou por formação de complexos de superfície de esfera externa. Por outro lado, o P-não lábil corresponde a formas insolúveis, com liberação mais lenta para a solução do solo, sendo retido principalmente por adsorção específica ou por complexos de esfera interna. A reação ocorre pela troca de ligantes do fosfato por hidroxila, resultando de uma a três ligações covalentes entre o ânion fosfato e os minerais do solo (Vilar; Vilar, 2013).

A reserva potencial de P no solo, representada pelas formas lábeis, inclui tanto o P adsorvido com baixa energia de ligação quanto a fração orgânica passível de mineralização microbiana. Em solos com pedogênese avançada, o P presente na biomassa e envolvido na biociclagem tende a ter maior relevância para a nutrição vegetal do que aquele adsorvido na matriz mineral do solo (Rheinheimer *et al*., 2020).

3.3 AVALIAÇÃO DO FÓSFORO DISPONÍVEL

A análise do solo é a principal ferramenta para a obtenção de dados gerados pela pesquisa sobre adubação de culturas para os produtores. As recomendações de adubação dependem da qualidade do diagnóstico realizado em relação ao grau de deficiência de determinados elementos no solo, conforme indicado pelo método de análise utilizado (Silva; Raij, 1999).

Segundo Santos *et al.* (2008), a avaliação da disponibilidade de P no solo é realizada por meio de soluções extratoras ou agentes de troca iônica, que têm como objetivo quantificar as formas do nutriente capazes de repor o P na solução do solo após sua absorção pelas plantas. Essas extrações fornecem informações sobre o P presente na solução do solo, relacionado ao fator intensidade (I), e sobre o P adsorvido na fase sólida, que constitui o fator quantidade (Q). O fator capacidade (C), também conhecido como poder tampão, representa a eficiência com que o Q recompõe o I, sendo influenciado pela energia de ligação do P aos colóides do solo e pela sua difusividade.

Dessa forma, os métodos de análise da fertilidade do solo visam estimar a fração do fator quantidade (Q) capaz de repor o fator intensidade (I), com o objetivo de prever a necessidade de adubação. A eficiência desses métodos depende diretamente da forma físico-química com que o nutriente está retido no solo e da capacidade do extrator em acessar essa fração. Além disso, a decisão sobre a aplicação de P e a definição da dose a ser aplicada estão mais relacionadas à calibração entre os teores extraídos e a resposta produtiva das culturas do que propriamente ao método de extração utilizado (Santos *et al.*, 2008). Portanto, além de eficientes na extração, é importante que os métodos utilizados apresentem boa correlação com o desempenho produtivo das plantas.

Embora existam diversos métodos de extração e técnicas analíticas para determinar os parâmetros físico-químicos do solo, a escolha do método deve levar em consideração fatores como precisão, exatidão, robustez, facilidade de aplicação, baixo custo, baixa sensibilidade e a capacidade de extrair múltiplos elementos ao mesmo tempo (Tiecher, 2016).

A diversidade de extratores de P reflete a complexidade do comportamento desse nutriente no solo, o que dificulta a definição de um método universalmente aceito para sua extração (Silva e Raij, 1999). Essa dificuldade está relacionada à adsorção de P aos colóides do solo, que ocorre com diferentes energias de ligação, resultando na formação de compostos de baixa solubilidade (Pavinato; Rosolem, 2008). A variação das formas de P no solo dificultam o desenvolvimento de extratores específicos, uma vez que determinadas formas tendem a predominar em certos solos. Além disso, os extratores disponíveis não são amplamente específicos, extraindo inevitavelmente parte de outras formas de P (Raij; Feitosa, 1980).

No estado do Rio Grande do Sul e Santa Catarina o método oficial de extração de P é M-1, que possui como vantagem a facilidade de execução e é um método calibrado para as espécies agrícolas mais cultivadas na região. O método da resina trocadora de

ânions (RNA) foi recomendado até o ano de 2016 pela Comissão de Química e Fertilidade do Solo dos estados do RS e SC (CQFS – RS/SC), contudo, devido a dificuldades operacionais de laboratório, esse serviço deixou de ser oferecido. Como alternativa, o extrator M-3 passou a ser recomendado, por se tratar de um extrator multielementar e por minimizar a influência dos fosfatos naturais no resultado analítico (Mumbach *et al.*, 2018).

Além do extrator utilizado, o processo metodológico em laboratório de rotina também pode influenciar nos resultados obtidos. O estudo realizado por Santos *et al.* (2014) buscou analisar a influência de variações na velocidade de agitação, no tempo de contato e na temperatura sobre a extração de P por diferentes extratores. Os autores observaram que velocidades de agitação superiores a 120 oscilações por minuto aumentam a quantidade de P extraída pelos extratores M-1 e M-3. Verificaram também, que tempos de repouso superiores a 16 horas interferem nos resultados obtidos com ambos os extratores. Além disso, destacaram que a climatização dos laboratórios, com temperatura controlada entre 20 e 30 °C, contribui para reduzir a variabilidade dos resultados provocada por oscilações térmicas.

3.4 EXTRAÇÃO DE FÓSFORO POR MEHLICH-1

O M-1 é uma solução composta por ácido clorídrico (0,05 mol/L) e ácido sulfúrico (0,0125 mol/L), proposta na década de 1950 para análises de solo na Carolina do Norte, EUA (Mehlich, 1953). Esse extrator indica o teor de "P disponível", ou seja, o valor obtido inclui o P em solução e parte do P adsorvido com menor energia às partículas do solo (CQFS-RS/SC, 2016).

O modo de ação dessa solução extratora baseia-se na solubilização do P através da redução do pH da suspensão solo:solução, atingindo valores de pH entre 2 e 3. Além disso, o sulfato proveniente do ácido sulfúrico desempenha papel importante na liberação dos fosfatos, dificultando sua readsorção imediata. No procedimento laboratorial, utilizam-se 3,0 cm^3 de solo e 30 mL da solução extratora. A concentração de P é determinada por colorimetria, com o uso de molibdato de amônio e uma solução redutora à base de ácido ascórbico, sendo os resultados expressos em mg/dm^3. Contudo, vale ressaltar que esse método pode superestimar os níveis de P em solos recentemente

tratados com fosfatos naturais, especialmente em aplicações realizadas nos últimos dois anos (CQFS-RS/SC, 2016).

Aspectos como a facilidade de execução, o baixo custo e a obtenção de extratos límpidos (característica essencial para a determinação por espectrometria de absorção molecular na região do UV/Visível) são apontados como vantagens desse método (Santos *et al.*, 2014).

Um dos principais desafios associados ao uso do extrator M1 é a frequente subestimação dos teores P-disponível em solos argilosos, especialmente naqueles com pH mais elevado. Isso ocorre devido à redução do poder de extração, pois o pH inicial do extrator, em torno de 1,2 é rapidamente tamponado pelos solos argilosos, que apresentam maior capacidade de neutralização da acidez, aproximando o pH da solução ao do solo. Além disso, o íon sulfato (SO_4^{2-}), presente no extrator, é prontamente adsorvido pelos sítios do solo que não estão ocupados por P, o que contribui ainda mais para a perda de eficiência na extração do nutriente (Novais; Smyth, 1999).

Outro problema relacionado a esse extrator é a superestimação dos teores de P-disponível em solos onde predomina a forma P-Ca. Nesses casos, os valores obtidos não refletem com precisão a real quantidade de P disponível para absorção pelas plantas, dificultando uma avaliação adequada da fertilidade do solo (Novais; Smyth, 1999).

3.5 EXTRAÇÃO DE FÓSFORO POR MEHLICH-3

O extrator M-3 (NH_4F 15 mmol/L + CH_3COOH 200 mmol/L + NH_4NO_3 250 mmol/L + HNO_3 13 mmol/L + EDTA 1 mmol/L, pH 2,5) foi desenvolvido por Mehlich (1984) após a insatisfação com o M-1, cuja capacidade preditiva se mostrou limitada em solos neutros a alcalinos. Anteriormente ao Mehlich-3, utilizou-se temporariamente nos laboratórios do Departamento de Agricultura da Carolina do Norte a solução extratora Mehlich-2 (Mehlich, 1978), que, apesar de extrair P, K, Ca, Mg, Mn e Zn, se mostrou inadequada devido às propriedades corrosivas de sua base clorada, que passaram a comprometer os equipamentos de laboratório utilizados nas análises.

O procedimento de análise utilizando o Mehlich-3 é o mesmo adotado para o Mehlich-1, diferenciando-se apenas pela substituição da solução extratora. O Mehlich-3 tem tamponamento do pH abaixo de 2,9, o que potencializa a ação do íon fluoreto na extração de P de compostos de ferro (Fe) e alumínio (Al), ao mesmo tempo em que minimiza a dissolução excessiva dos fosfatos de cálcio, como ocorre com os fosfatos

naturais. A presença do nitrato de amônio na solução contribui para a extração de cálcio (Ca), magnésio (Mg), sódio (Na) e potássio (K). Já o ácido nítrico atua na extração da fração disponível dos fosfatos de cálcio e dos micronutrientes, enquanto o EDTA forma quelatos com esses micronutrientes, evitando sua readsorção ao solo (CQFS-RS/SC, 2016).

A eficiência do extrator M3 está associada a diversas vantagens, como a facilidade de execução, o baixo custo, a rapidez do procedimento e a limpidez do extrato (Bortolon et al., 2009). Além disso, por ser um extrator multielementar, sua utilização em conjunto com a espectrometria de emissão óptica com plasma induzido (ICP-OES) permite a determinação simultânea de P, K, Na, Ca, Mg, Mn, Zn e Cu em um único extrato, o que aumenta a eficiência das análises laboratoriais (Mehlich, 1984; Bortolon *et al.*, 2009).

Mumbach *et al.* (2018), estudando a capacidade de extração dos métodos M-1, M-3 e RTA em 301 amostras de solos do Estado de Santa Catarina com diferentes teores de argila, concluíram que os métodos Mehlich-3 e a resina extraem, em média, 12% mais P do que o Mehlich-1, apresentando alta correlação com o método padrão, o que permite utilizá-los como substitutos. Além disso, observaram que os métodos M-1, M-3 e resina são sensíveis ao teor de argila do solo, com a extração diminuindo em solos mais argilosos. De forma geral, o Mehlich-3 extrai mais P que o Mehlich-1 em solos arenosos, mas menos em solos argilosos. Nesse sentido, foi proposta a utilização da equação [P-M1eq = (P-M3/(1,38-(0,01*arg))] para converter os teores obtidos com o M-3 para os valores de M-1, facilitando a interpretação da disponibilidade de P para as culturas.

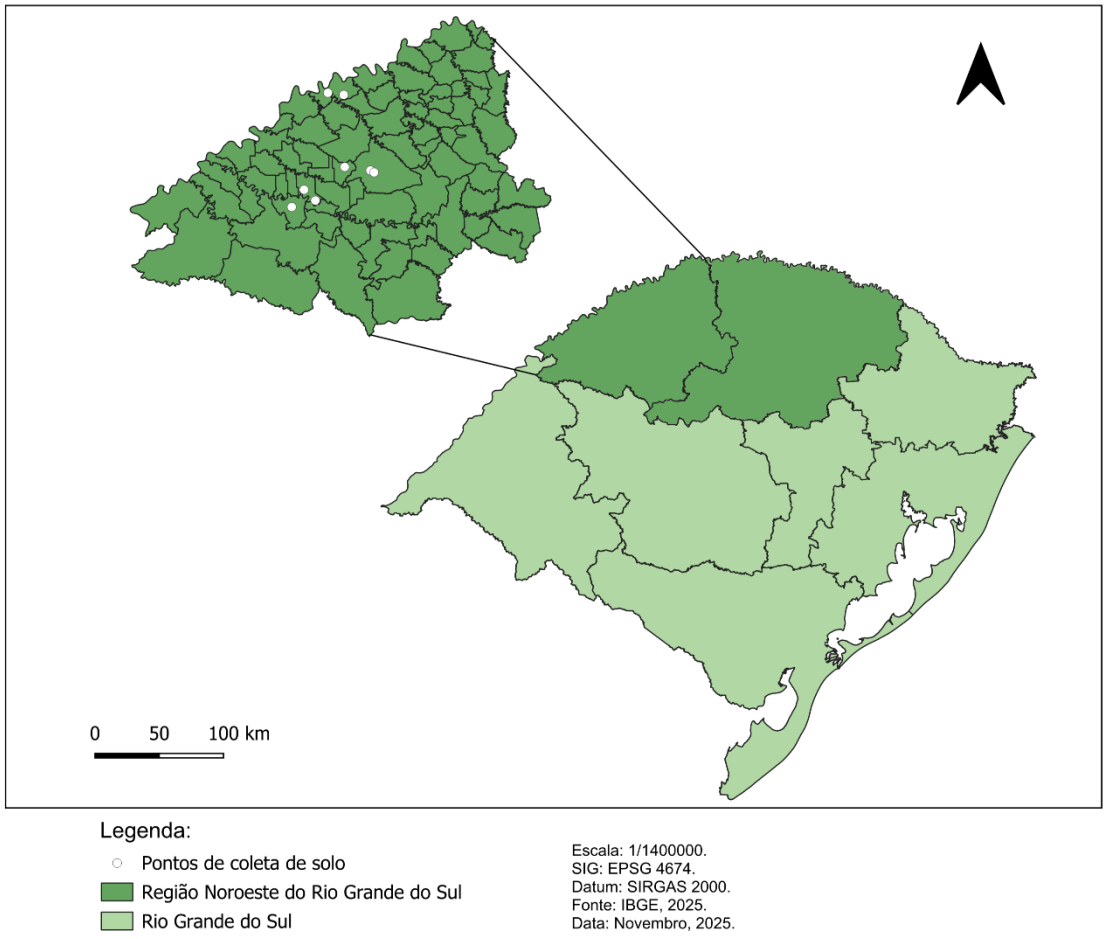
A comparação dos extratores Mehlich-1 e Mehlich-3 na avaliação da disponibilidade de P para o milho em solos do Rio Grande do Sul, realizada por Bortolon *et al.* (2009) retrata que o Mehlich-3 extraiu, em média, de 50% a 150% mais P que o Mehlich-1. Apesar disso, ambos apresentaram alta correlação, indicando que podem ser utilizados na estimativa do P disponível no solo. No entanto, em solos mais argilosos, o Mehlich-3 extraiu menos P que o Mehlich-1, evidenciando que o teor de argila interfere na eficiência do extrator e exigindo ajustes na interpretação dos resultados. Além disso, os dois métodos apresentaram boa relação com o acúmulo de P nas plantas e a produção de matéria seca, reforçando sua eficácia na estimativa da disponibilidade de P para o milho.

A sensibilidade do extrator Mehlich-3 às variações de tipos de solo é maior que a do extrator Mehlich-1, aspecto de importância, tendo em vista a variedade de solos que são analisados em um mesmo laboratório (Silva et al., 1999; Bortolon et al., 2009).

4 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado com amostras de solos previamente coletadas e incubadas por Barbosa (2023). Esta coleta foi realizada a partir da seleção de 30 locais, na camada 0-20 cm, de solos sob uso agrícola da região noroeste do Rio Grande do Sul (Figura 1), as quais foram identificadas, secas em estufa com circulação de ar forçado a 60 °C por 72 horas, moídas e peneiradas em malha de 2 mm. Após análise do teor de P disponível por Mehlich-1 e teor de argila, as amostras de solo foram classificadas como Muito Baixo, Baixo e Médio (CQFS-RS/SC 2016).

Figura 1: Distribuição espacial dos 8 solos da região noroeste do estado do Rio Grande do Sul selecionados para o experimento.



As amostras de solo foram avaliadas quanto ao pH e índice TSM, sendo incubadas com óxido de cálcio e magnésio para correção da acidez do solo com objetivo de atingir 6,0 de acordo com CQFS-RS/SC (2016). Após 20 dias, os solos foram secos em estufa a

60 °C por 72 horas e reanalisados o pH, TSM, teores de P e K disponíveis por Mehlich-1 e teores de Ca e Mg por KCl 1M.

A partir dos solos com acidez corrigida foi realizada a incubação com seis doses de P_2O_5 (0, 40, 80, 160, 240 e 480 kg ha^{-1}), correspondentes a 0, 25, 50, 100, 150 e 300% da recomendação para solos com P muito baixo, segundo o CQFS-RS/SC (2016). As doses foram preparadas a partir de uma solução de 1050 mg P L^{-1}, utilizando fosfato de amônio ($NH_4H_2PO_4$). Os solos foram alocados em embalagens plásticas contendo 50 gramas de solo cada, e incubados por 20 dias com umidade ajustada a 80% da capacidade de campo, com reposições semanais de água destilada (Mumbach, 2021).

Após a incubação, as amostras de solos foram secas a 60°C por 72 horas e peneirados (2 mm). Barbosa (2023) analisou estas amostras quanto ao P disponível por Mehlich-1 conforme Tedesco et al. (1995), determinando a CTP a partir do inverso do coeficiente angular das equações lineares ajustadas entre as doses aplicadas e os teores de P extraído, ou seja:

$$CTP = \frac{1}{Coeficiente\ angular}$$

Posteriormente, analisou-se a influência da argila e do teor inicial de P sobre a CTP, com base nas classes do CQFS-RS/SC (2016).

Neste estudo, 45 das amostras de 8 solos incubadas com doses de P e utilizadas por Barbosa (2023) (Tabela 1) foram reanalisadas quanto aos teores de P disponíveis por Mehlich-3 e Mehlich-1. A extração consistiu na adição da solução extratora ao solo, na proporção de 1:10 (solo:solução), seguida de agitação por 5 minutos em mesa agitadora orbital e posterior decantação por 16 horas, conforme descrito por Tedesco et al. (1995). O extrator M-3 foi preparado de acordo com Mehlich (1984). O procedimento de extração com M-3 foi idêntico ao utilizado para M-1. A determinação do teor de P foi realizada por espectrofotometria de absorção molecular, com leitura em comprimento de onda de 882 nm, conforme a metodologia descrita por Murphy & Riley (1977).

Tabela 1: Caracterização textural e atributos químicos dos 8 solos selecionados na região noroeste do RS.

Amostra	Município	Argila	Silte	Areia	pH	Ca^{2+}	Mg^{2+}	CTC pH7,0	P	K
		----------%----------				---------$cmol_c\ dm^{-3}$----------			$mg\ dm^{-3}$	$mg\ dm^{-3}$
K01	Cerro Largo	56	35,3	8,71	6,14	7,7	3,5	14,93	2,9 (MB)	169
K02	Giruá	81,2	18	0,82	6,47	3,6	3,4	8,9	0,6 (MB)	7
K03	Senador Salgado Filho	47,5	47,6	4,89	6,32	9,5	4,2	16,9	8,4 (M)	69
K05	Mato Queimado	47,6	27,1	25,32	6,47	5,8	3,4	11,72	6,3 (B)	69
K06	Rolador	59,1	33,9	6,94	6,42	6	4,3	13,19	4,5 (B)	148
K07	Novo Machado	57,7	29,7	12,56	6,38	7	2,5	12,12	1,3 (MB)	32
K08	Novo Machado	81,7	17,7	0,64	6,21	5,3	3,7	11,49	0,7 (MB)	29
K09	Giruá	70,2	27,2	2,62	6,73	4,1	4,2	10,1	0,3 (MB)	22

Siglas (MB), (B) e (M) representam a classe de disponibilidade de fósforo: muito baixo, baixo e médio, respectivamente, conforme CQFS-RS/SC (2016).

Fonte: adaptado de Barbosa, 2023.

Os resultados da análise de solo, extraídos por meio das soluções de Mehlich-1 e Mehlich-3, foram correlacionados com o objetivo de estabelecer uma equação de ajuste entre os dois métodos. As correlações foram realizadas considerando o conjunto completo de dados e também estratificadas conforme as classes de argila.

As análises de solo obtidas por Mehlich-3, referentes aos solos incubados, serão relacionadas às doses de P_2O_5 aplicadas na incubação. A partir dessas relações, serão geradas equações que permitirão a determinação da Capacidade Tampão de Fósforo (CTP).

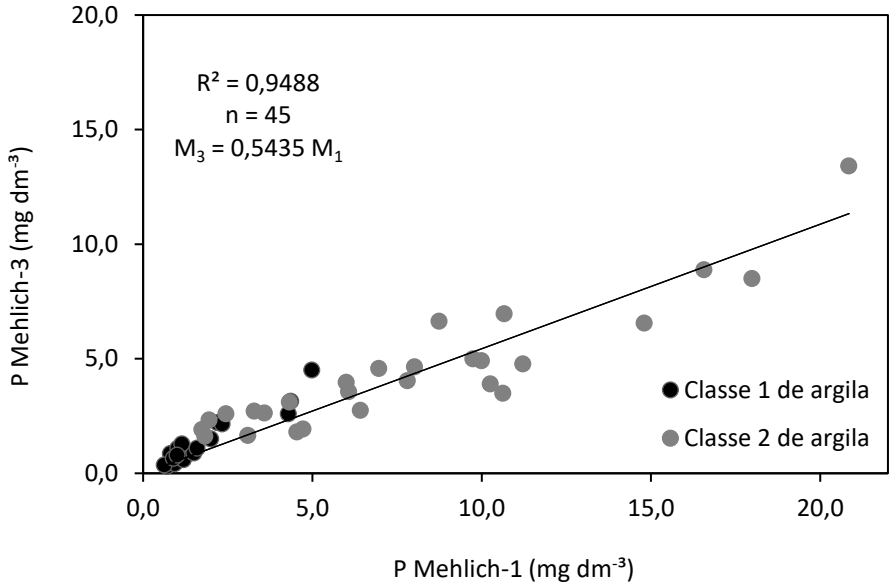
A correlação entre os valores de CTP e os atributos do solo foi realizada por meio do teste de correlação de Pearson ($p < 0,05$). Os valores de CTP obtidos foram

comparados por meio de análise estatística descritiva, utilizando gráficos, estratificados de acordo com as classes de argila, conforme os critérios estabelecidos pela CQFS-RS/SC (2016).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os teores de P extraídos pelos métodos M-1 e M-3 apresentaram correlação positiva e altamente significativa (Figura 2), com coeficiente de correlação de Pearson (r) de 0,94 e coeficiente de determinação (R^2) de 0,94. Esta forte associação entre os métodos corrobora com os resultados de Bortolon e Gianello (2008) e Mumbach et al. (2018), que também observaram alta correlação em solos do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, indicando que ambos os extratores possuem potencial para avaliação da disponibilidade de fósforo nos solos da região noroeste do RS.

Figura 2: Correlação entre os teores de P extraído pelas soluções de Mehlich-1 e de Mehlich-3 em 8 solos do Noroeste do Rio Grande do Sul.



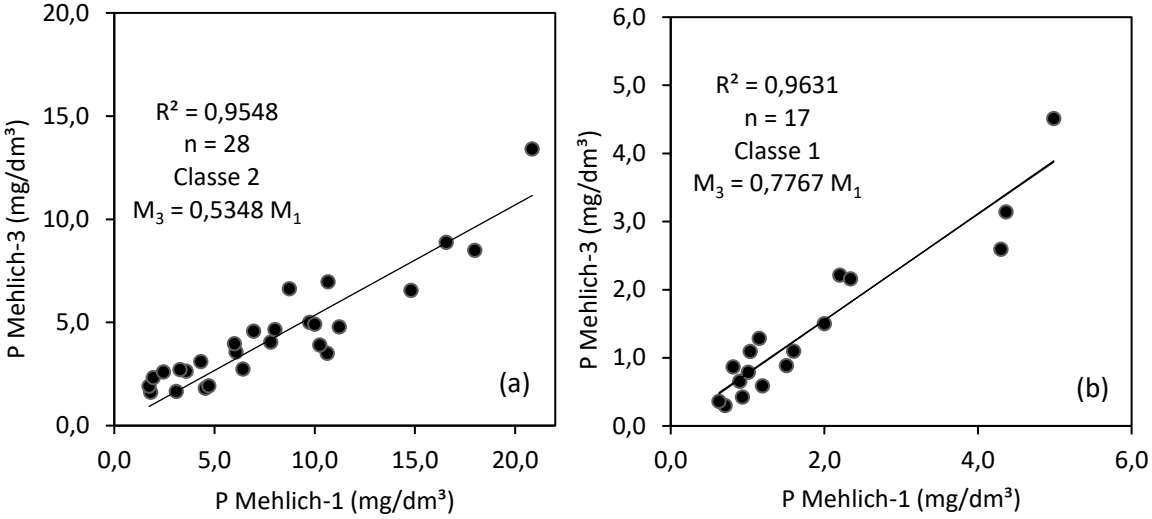
Entretanto, a análise mais detalhada dos dados revela que o extrator M-3 extraiu, em média, 41% menos fósforo que o M-1 (Tabela 2), com valores médios de 3,3 mg dm^{-3} e 5,6 mg dm^{-3}, respectivamente. Este comportamento difere significativamente de estudos realizados em solos arenosos, onde o M-3 geralmente extrai quantidades superiores de P. Como explicação para este resultado, Mumbach et al. (2018) atribuem a sensibilidade diferencial dos extratores ao teor de argila do solo. Nos solos estudados, que apresentam teor médio de argila de 62,6% (variando de 47,5% a 81,7%), a maior capacidade tampão e a mineralogia provavelmente rica em óxidos de Fe e Al, características típicas dos solos da região, podem ter limitado a eficiência extrativa do M-3.

Tabela 2: Amplitude dos valores de pH, teores de argila e P extraídos pelas soluções de Mehlich-1 e de Mehlich-3.

			P extraído	
Variável	pH água	Argila	Mehlich-1	Mehlich-3
		(%)	mg dm $^{-3}$	
Média	6,4	62,6	5,6	3,3
Desvio padrão (%)	0,2	13,6	5,0	2,6
Máximo	6,7	81,7	20,9	13,4
Mínimo	6,1	47,5	0,6	0,3
Mediana	6,4	58,4	4,3	2,7
		----------Classe 1----------		
Média	6,5	77,7	1,9	1,4
Desvio padrão (%)	0,3	6,5	1,4	1,1
Máximo	6,7	81,7	5,0	4,5
Mínimo	6,2	70,2	0,6	0,3
Mediana	6,5	81,2	1,2	1,1
		----------Classe 2----------		
Média	6,3	53,6	7,9	4,4
Desvio padrão (%)	0,1	5,6	5,1	2,7
Máximo	6,5	59,1	20,9	13,4
Mínimo	6,1	47,5	1,7	1,6
Mediana	6,4	56,0	7,0	3,9

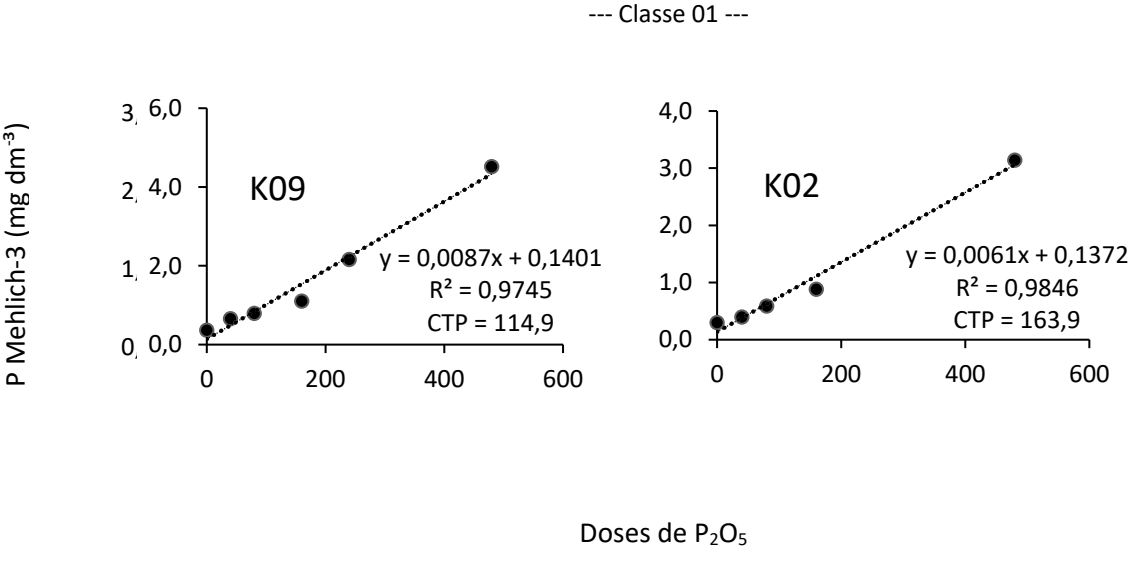
A estratificação das amostras por classe de argila, conforme proposto pela CQFS-RS/SC (2016), permitiu verificar o comportamento diferenciado dos extratores em função da textura do solo. Nos solos classificados na Classe 2 (teor de argila entre 410 e 600 g dm^{-3}), o M-3 extraiu, em média, 44% menos P em relação ao M-1, enquanto nos solos da Classe 1 (teor de argila > 600 g dm^{-3}), essa diferença diminuiu para 26% (Figura 3). Este gradiente de eficiência extrativa em função do teor de argila está em concordância com os resultados de Mumbach et al. (2018), que observaram que o M-3 extrai mais P que o M-1 em solos arenosos, mas menos em solos argilosos. Na classe 1, a menor subestimação nos teores de P pode ser explicada pela pequena amplitude na variação dos teores do nutriente nos solos estudados.

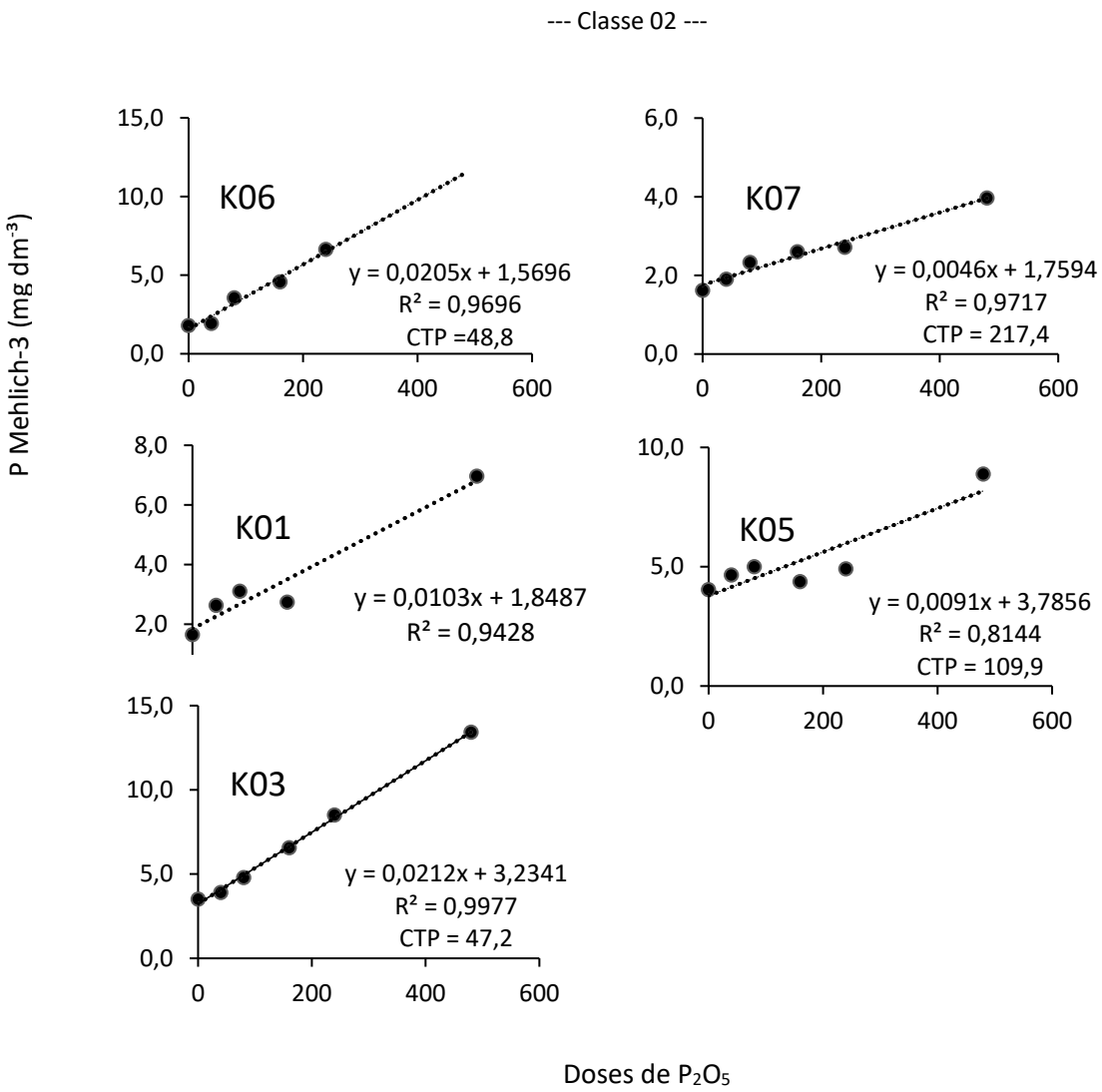
Figura 3: Correlação entre os teores de P extraído pelas soluções de Mehlich-1 e de Mehlich-3 para as classes de argila 410 a 600 g dm-3 (a) e > 600 g dm-3 (b).



A redução na capacidade extrativa do M-3 em solos mais argilosos pode ser atribuída a dois fatores principais: primeiro, a maior readsorção de P durante o período de decantação de 16 horas, como demonstrado por Steiner *et al.* (2012); segundo, a presença de óxidos de Fe e Al em solos mais intemperizados, que promovem adsorção específica de P com alta energia de ligação, limitando a ação do fluoreto presente no M-3. Esta hipótese é reforçada pelos dados de Mumbach *et al*. (2018), que observaram redução de 78.5% (M1) e 93.6% (M3) na extração de P com o aumento do teor de argila de 20% para 80%.

Figura 4: Teores de P extraídos por Mehlich-3 em solos incubados com seis doses de P2O5, agrupados nas Classes 1 e 2, em ordem decrescente de argila.





Os valores de CTP determinados a partir do extrator M3 variaram significativamente entre as amostras analisadas, compreendendo uma amplitude de 47,2 a 270,3 kg ha^{-1} de P_2O_5 (Figura 4). Os solos K08 e K07 destacaram-se pelos maiores valores de CTP, registrando 270,3 e 217,4 kg ha^{-1} de P_2O_5, respectivamente.

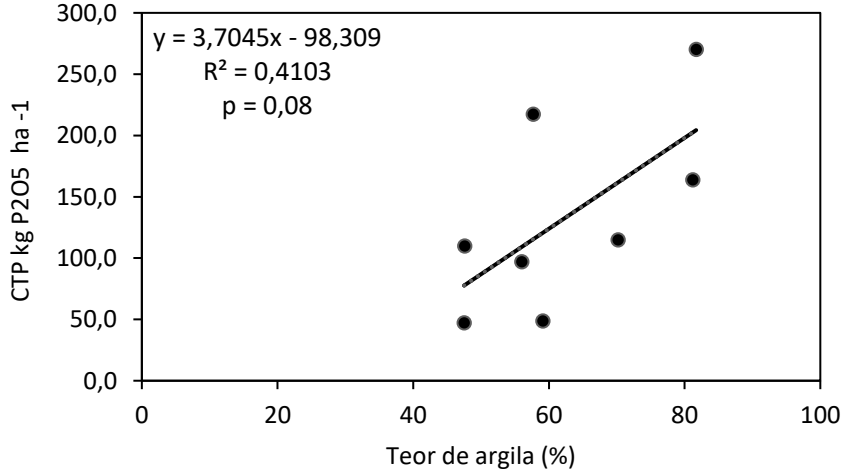
O maior valor de CTP, apresentado pelo solo K08, pode ser explicado pelo seu teor de argila, o maior dentre todas os solos (81,7%). Esta relação direta entre teor de argila e CTP era esperada, uma vez que solos com maior conteúdo argiloso possuem maior densidade de sítios de adsorção, especificamente em óxidos de ferro e alumínio, os quais formam ligações de alta energia com o fósforo, convertendo-o rapidamente em

formas não-lábeis (Mumbach et al., 2020). Conforme demonstrado por Bortolon & Gianello (2008), a capacidade de adsorção de P aumenta progressivamente com o teor de argila, uma vez que a fração argilosa fornece uma maior superfície específica para a fixação do nutriente.

Quanto ao solo K07, que obteve a segunda maior CTP (217,4 kg ha^{-1}), este resultado pode ser atribuído não apenas ao seu teor de argila (57,7%), mas também à sua mineralogia. Solos com predominância de argilas do tipo 1:1 e óxidos de ferro e alumínio de alta área superficial, como goethita e hematita, apresentam elevada afinidade por ânions fosfato, aumentando a capacidade de retenção de P nestes solos (Mumbach et al., 2020).

Estes resultados reforçam que a CTP é influenciada por uma combinação de fatores, sendo o teor de argila o principal, porém não único determinante. A mineralogia da fração argila, e a matéria orgânica desempenham papéis complementares cruciais na definição da capacidade tampão de fósforo no solo, explicando as variações observadas mesmo dentro de uma mesma classe textural. A análise de dispersão entre o teor de argila e a CTP (Figura 5) revelou uma correlação positiva moderada (r = 0,64), com um coeficiente de determinação (R^2) de 0,41. Isto significa que 41% da variabilidade na CTP entre os solos estudados é explicada pelo seu teor de argila. Este resultado reforça a importância do atributo textural no manejo da adubação fosfatada, indicando que solos mais argilosos tendem a exigir doses mais elevadas de P_2O_5 para elevar a disponibilidade do nutriente.

Figura 5: Dispersão dos teores de argila do solo e a Capacidade Tampão de Fósforo (CTP) dos solos analisados por solução Mehlich-3.



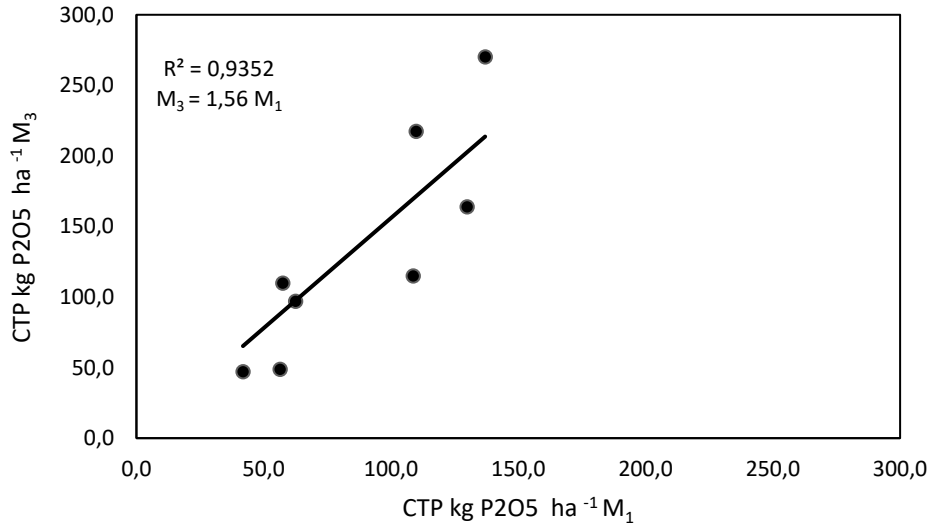
Contudo, os 59% da variação restante evidenciam que outros fatores, além do teor de argila, têm influência significativa na CTP. Esta constatação é fundamental para um manejo ainda mais preciso, mostrando que, embora a textura seja um excelente parâmetro inicial para a recomendação, a consideração de outros atributos químicos e mineralógicos podem refinar ainda mais as doses de fertilizante fosfatado necessárias para cada solo.

Tabela 3: Teores de fósforo extraídos por Mehlich-1 em função das doses de P2O5 aplicadas e os valores de Capacidade Tampão de Fósforo (CTP) correspondentes.

Amostra	Equação Linear	CTP
		kg ha^{-1} de P_2O_5
K01	y = 0,016x + 3,1953	62,5
K02	y = 0,0077x + 0,5691	129,9
K03	y = 0,0239x + 10,302	41,8
K05	y = 0,0174x + 7,5113	57,5
K06	y = 0,0177x + 4,3703	56,5
K07	y = 0,0091x + 1,3596	109,9
K08	y = 0,0073x + 0,6972	137,0
K09	y = 0,0092x + 0,3858	108,7

A CTP determinada para o extrator Mehlich-1 variou de 41,8 a 137,0 kg ha^{-1} de P_2O_5 entre as amostras (Tabela 3). Os maiores valores de CTP foram observados nas amostras K08 (137,0) e K02 (129,9), consistentes com seus elevados teores de argila. Esses solos argilosos possuem maior densidade de sítios de adsorção, especialmente de óxidos de Fe e Al, que fixam o P em formas não-lábeis, exigindo maiores doses de fertilizante para elevar a disponibilidade deste nutriente (Bortolon & Gianello, 2008; Mumbach et al., 2020). Em contraste, a amostra K03 apresentou a menor CTP (41,8), condizente com seu menor teor de argila. Estes resultados reforçam a necessidade de ajuste das doses de P_2O_5 conforme a CTP de cada solo.

Figura 6: Correlação entre a CTP obtida pelas soluções de Mehlich-1 e de Mehlich-3.



A Figura 6 evidência a forte correlação positiva ($R^2 = 0,9352$) entre os valores de CTP determinados pelos extratores Mehlich-1 e Mehlich-3, demonstrando consistência entre os métodos na avaliação da capacidade de adsorção de fósforo nos solos estudados. A equação de regressão $M_3 = 1,56\ M_1$ ($R^2 = 0,93$) indica que o Mehlich-3 tende a gerar valores de CTP aproximadamente 56% maiores aos obtidos pelo Mehlich-1. Esta diferença pode ser atribuída às distintas composições químicas dos extratores bem como às suas interações com o cada solo e suas características específicas.

A forte correlação observada válida a possibilidade de conversão entre os métodos, sendo crucial para regiões onde ambos os extratores são utilizados. No entanto, a relação não unitária (1,56) ressalta a importância de utilizar equações de ajuste específicas para conversão adequada dos valores, assegurando precisão nas recomendações de adubação fosfatada conforme a realidade local.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O extrator M3 apresenta alta correlação com o M1 (r = 0,94) na estimativa da disponibilidade de P em solos da região noroeste do Rio Grande do Sul, demonstrando potencial para substituição do método convencional.

A eficiência extrativa do M3 é significativamente influenciada pelo teor de argila do solo, extraindo quantidades progressivamente menores de P em comparação ao Mehlich-1 à medida que aumenta o teor de argila.

A capacidade tampão de fósforo (CTP) determinada via Mehlich-3 variou de 47,2 a 270,3 kg ha^{-1} de P_2O_5, apresentando correlação positiva com o teor de argila (r = 0,64), o que reforça a importância da textura no manejo da adubação fosfatada na região;

Recomenda-se que laboratórios da região que venham a adotar o Mehlich-3 considerem a influência do teor de argila na interpretação dos resultados e utilizem equações de conversão calibradas localmente para garantir a precisão das recomendações de adubação.

Estes resultados são relevantes para o diagnóstico da fertilidade dos solos na região noroeste do RS, servindo como apoio para uma transição segura para o extrator Mehlich-3, que apresenta vantagens operacionais significativas por ser multielementar e permitir análise simultânea de vários nutrientes.

REFERÊNCIAS

BARBOSA, G. J. K. Tamponamento de fósforo e adubação corretiva em solos da região Noroeste do Rio Grande do Sul. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) – Universidade Federal da Fronteira Sul, Cerro Largo, 2023.

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, Viçosa, MG, v. 32, n. esp., 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*, Lages, v. 10, n. 4, p. 305–311, jul. 2009.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – RS/SC. *Manual de calagem e adubação para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina*. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Núcleo Regional Sul, 2016.

GATIBONI, L. C. et al. Fracionamento químico das formas de fósforo do solo: usos e limitações. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 36, n. 4, p. 1105–1119, 2012.

GUSTAFSSON, J. P.; MWAMILA, L. B.; KERGOAT, K. The pH dependence of phosphate sorption and desorption in Swedish agricultural soils. *Geoderma*, Amsterdam, v. 189–190, p. 304–311, nov. 2012.

LOPES, A. S. *Manual internacional de fertilidade do solo*. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fósforo, 1995. p. 53.

MEHLICH, A. Determination of P, Ca, Mg, K, Na and NH4 by North Carolina Soil Testing Laboratories. Raleigh: University of North Carolina, 1953. (não publicado).

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

MEHLICH, A. New extractant for soil test evaluation of phosphorus, potassium, magnesium, calcium, sodium, manganese and zinc. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v. 9, p. 477–492, 1978.

MUMBACH, G. L.; OLIVEIRA, D. A. D.; WARMLING, M. I.; GATIBONI, L. C. Quantificação de fósforo por Mehlich 1, Mehlich 3 e resina trocadora de ânions em solos com diferentes teores de argila. *Revista Ceres*, Viçosa, v. 65, n. 6, p. 546–554, dez. 2018.

MUMBACH, G. L.; GATIBONI, L. C.; DALL'ORSOLETTA, D. J.; SCHMITT, D. E.; PESSOTTO, P. P.; OLIVEIRA, C. M. B. Phosphorus Extraction with Soil Test Methods Affected by Soil P Sorption Capacity. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, [S. l.], v. 20, p. 1-13, 2020.

MUMBACH, Gilmar Luiz. Incorporação de Fósforo na Implantação do Sistema de Plantio Direto e Calibração da Adubação Fosfatada de Correção em Solos do RS e SC. 2021. Tese (Doutorado) – Ciência do Solo, Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), Lages, 2021.

NOVAIS, R. F. et al. *Fertilidade do solo*. Brasília: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007.

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

PAVINATO, P. S.; ROSOLEM, C. A. Disponibilidade de nutrientes no solo: decomposição e liberação de compostos orgânicos de resíduos vegetais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 32, n. 3, p. 911–920, 2008.

PINTO, F. A. *Sorção e dessorção de fósforo em solos de Cerrado*. Jataí: Universidade Federal de Goiás, 2012. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Produção Vegetal) – UFG.

RAIJ, B. V. *Fertilidade do solo e manejo de nutrientes*. 2. ed. Campinas: NPCT, 2019.

RAIJ, B. V. *Avaliação da fertilidade do solo*. Piracicaba: Instituto da Potassa & Fosfato; Instituto Internacional da Potassa, 1981.

REIS, J. V. D. *Potencial do extrator Mehlich-3 na avaliação da disponibilidade de fósforo de diferentes solos*. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2016. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – UFV.

RHEINHEIMER, D. dos S.; ANGHINONI, I.; CONTE, E.; KAMINSKI, J.; GATIBONI, L. C. Dessorção de fósforo avaliada por extrações sucessivas em amostras de solo provenientes dos sistemas plantio direto e convencional. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 33, p. 1053–1059, 2003.

RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I.; CONTE, E. Sorção de fósforo em função do teor inicial e de sistemas de manejo de solos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 27, n. 1, p. 41–49, 2003.

RHEINHEIMER, D. S. et al. *Ciclo biogeoquímico do fósforo, diagnóstico de disponibilidade e adubação fosfatada*. Porto Alegre: Autores, 2020. p. 35.

RONQUIM, C. C. *Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais*. Campinas: Embrapa Territorial, 2020. p. 26.

SANTOS, D. R. D.; GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 38, n. 2, p. 576–586, 2008. https://doi.org/10.1590/S0103-84782008000200049.

SANTOS, D. R.; MARTINAZZO, R.; GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J.; SILVA, L. S. D. Amplitude no fósforo microbiano em um Argissolo em pastagem nativa submetida à roçada e à introdução de espécies forrageiras com fertilização fosfatada em diferentes épocas. *Acta Scientiarum. Agronomy*, Maringá, v. 30, n. 4, p. 561–567, 2008.

SANTOS, L. D. S.; SILVA, L. S. D.; CARGNELUTTI FILHO, A.; GRIEBELER, G. Efeito do grau de moagem, do tipo de frasco e do volume vazio sobre a variabilidade analítica do fósforo extraído pelos métodos Mehlich-1 e Mehlich-3. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 38, n. 5, p. 1478–1486, 2014.

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

STEINER, F. et al. Extraction methods and availability of phosphorus for soybean in soils from Paraná State, Brazil. Semina: Ciências Agrárias, Londrina, v. 33, n. 3, p. 1005-1014, 2012.

TEDESCO, J. M.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEM, H.; VOLKWEISS, S. J. *Análise de solo, plantas e outros materiais*. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS, 1995. 174 p. (Boletim Técnico de Solos, 5).

TIECHER, T. et al. *Evolução e estado da fertilidade do solo no Norte do Rio Grande do Sul e Sudoeste de Santa Catarina*. Porto Alegre: UFRGS, 2016. p. 10.

VAN RAIJ, B.; FEITOSA, C. T. Correlação entre o fósforo extraído de solos por diversos extratores químicos e o absorvido pelo milho. *Bragantia*, Campinas, v. 39, n. 1, p. 51–57, 1980.

VILAR, C. C.; VILAR, F. C. M. Comportamento do fósforo em solo e planta. *Revista Campo Digital*, [s.l.], v. 8, n. 2, 2013.