



C A P Í T U L O 5

Intensidade de agitação na etapa de extração do fósforo do solo, com uso do extrator Mehlich-1

Francisco de Souza Fadigas

Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas (CETEC) / Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), Cruz das Almas, Bahia, Brasil

Oldair Vinhas Costa

Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas (CCAAB) / Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), Cruz das Almas, Bahia, Brasil

Maria Amelia de Pinho Barbosa Hohlenwenger

Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas (CETEC) / Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), Cruz das Almas, Bahia, Brasil

Magnison dos Santos

Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas (CCAAB) / Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), Cruz das Almas, Bahia, Brasil

Maria Paula Santa Ritta Amancio

Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas (CCAAB) / Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), Cruz das Almas, Bahia, Brasil

Resumo: O método de extração de P, descrito por alguns autores, não especifica qual intensidade de agitação deve ser empregada no uso da mesa agitadora orbital para obtenção do extrato contendo o P, quando se utiliza o extrator Mehlich-1. Assim, o objetivo desta pesquisa foi estudar o efeito de diferentes intensidades de oscilações por minuto (opm) no ajuste da mesa agitadora, durante o processo de extração, e avaliar o impacto do uso de uma esfera de vidro durante o processo de extração. As amostras de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico, representando os horizontes A, Bt1 e Bt2 foram submetidas à agitação com 100, 120, 140, 160, 180, 200 e 220 opm. Em outro experimento, amostras da camada de 0 a 20 cm de seis solos representativos dos Tabuleiros Interioranos do Recôncavo Baiano foram submetidas à agitação a 100, 120, 140, 160, 180, 200 opm em mesa agitadora orbital. Em um terceiro experimento, as amostras dos solos mencionados foram agitadas a 120, 180 e 220 opm, combinadas com a presença e ausência de uma

esfera de vidro. Em todos os ensaios, as amostras foram agitadas, por 5 minutos, com 50 mL de solução Mehlich-1, sendo utilizadas três repetições por tratamento. Nas curvas de calibração foram utilizadas soluções padrão contendo 1, 2, 3 e 4 mg L⁻¹ de P e 0,5, 1,0, 1,5 e 2,0 mg L⁻¹, respectivamente. As leituras de absorvância foram efetuadas a 660nm, em espectrofotômetro UV-VIS. Em todos os ensaios, as maiores quantidades de P disponível no extrato foram obtidas com agitação em torno de 180 opm, para os horizontes e solos estudados. O aumento da intensidade de agitação, acima desse valor, resultou em menores concentrações de P no extrato, o que, possivelmente, pode estar associado ao processo de readsorção do P na fase sólida do solo. Considerando a média dos pontos de máxima (PMx) das equações quadráticas obtidas para os horizontes e solos em estudo, pode-se concluir que 180 opm representa a intensidade ideal de agitação para obtenção da disponibilidade máxima de P no extrato, em solos com características similares ao deste estudo. O uso da esfera de vidro não resultou em maior teor de fósforo disponível no extrato do solo, independente da intensidade de agitação.

Palavras-chave: análise química; dessorção; oscilações por minuto; solução extratora.

Agitation intensity in the soil phosphorus extraction stage, using the Mehlich-1 extractor

Abstract: The phosphorus (P) extraction method described by some authors does not specify the agitation intensity required when using the orbital shaker for obtaining the extract containing P, particularly when using the Mehlich-1 extractor. Thus, the aim of this study was to investigate the effect of different oscillation intensities (oscillations per minute, opm) on shaker adjustment during the extraction process, and to evaluate the impact of using a glass sphere during extraction. Samples from Chromic Acrisol (Clayic), representing the A, Bt1, and Bt2 horizons, were subjected to agitation at 100, 120, 140, 160, 180, 200, and 220 opm. In a second experiment, samples from the 0–20 cm layer of six representative soils from the Inland Tablelands of the Recôncavo Baiano were agitated at 100, 120, 140, 160, 180, and 200 opm on an orbital shaker. A third experiment involved agitation at 120, 180, and 220 opm, with and without the presence of a glass sphere. In all experiments, the samples were agitated for 5 minutes with 50 mL of Mehlich-1 solution, using three replicates per treatment. Calibration curves were generated using standard solutions containing 1, 2, 3, and 4 mg L⁻¹ of P and 0.5, 1.0, 1.5, and 2.0 mg L⁻¹, respectively. Absorbance readings were performed at 660 nm using a UV-VIS spectrophotometer. In all assays, the highest P concentrations in the extract were obtained at approximately 180 opm for the horizons and soils studied. Increasing agitation intensity beyond this point resulted in lower P concentrations in the extract, likely due to P re-adsorption onto the solid phase of the soil. Considering the average maximum points (PMx) from quadratic equations obtained for the studied horizons and soils, it can be concluded

that 180 rpm represents the optimal agitation intensity for maximizing P availability in the extract from soils with similar characteristics to those in this study. The use of the glass sphere did not result in higher phosphorus availability in the soil extract, regardless of the agitation intensity.

Keywords: chemical analysis; desorption; oscillations per minute; extracting solution.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com Vinhal-Freitas *et al.* (2010), o processo de dessorção é definido como a liberação de uma substância ou material de uma interface entre uma superfície sólida e uma solução. No Brasil, diversos pesquisadores têm conduzido estudos sobre a dessorção de fósforo (P) do solo, com o objetivo de avaliar a disponibilidade desse elemento para as plantas. Neste contexto, os métodos de extração mais utilizados incluem a utilização do extrator Mehlich-1 e a Resina trocadora de ânions (RTA).

O processo de extração do fósforo (P) em amostras de terra, assistido por agitação, tem sido reportado na literatura sobre análise de solos desde a proposição inicial apresentada por Mehlich (1953), tendo sido estudado e modificado por diversos pesquisadores. Contudo, o método de extração de fósforo

(P) descrito no *Manual de métodos de análise de solo* (Teixeira *et al.*, 2017), assim como em outras fontes (Silva, 2009; Raposo, 2014; Silva, 2018), não especifica a qual intensidade de agitação as amostras devem ser submetidas durante o uso da mesa agitadora orbital, para obtenção do extrato contendo o P, quando se utiliza o extrator Mehlich-1.

Há menções na literatura para que se utilize 110 -120 rpm, por 5 min, em agitador horizontal (Tedesco *et al.*, 1995), 190 rpm, em agitador horizontal, por 5 min (Freitas, 2012), 250 rpm durante 5 min (Meneghetti, 2018) e 10 minutos em agitador circular horizontal a 200 rpm (Sá; Guedes, 2023).

A maioria dos autores concorda em relação ao tempo de agitação, adotando o tempo de 5 min como padrão (Silva *et al.*, 1998; Primavesi, 2005; Silva, 2009; Raposo, 2014; Teixeira *et al.*, 2017). Entretanto, Silva (2018) recomenda a agitação durante 30 minutos, em agitador horizontal circular, e deixar em repouso por uma noite, em frasco tampado, antes de pipetar o sobrenadante. Sá e Guedes (2023) recomendam agitar por 10 min, deixando o extrato decantar por 16 h. Acreditamos que o processo de dessorção do P, associado à fase sólida do solo, pode ser influenciado pelo tempo e pela intensidade de agitação imprimida durante a fase de extração.

As reações de sorção (adsorção e dessorção) ocorrem naturalmente nos solos, como resultado das interações de íons em solução com as fases reativas do solo (óxidos, hidróxidos, argilominerais, carbonatos e matéria orgânica), sendo, portanto, de intensidade variável devido às diferentes energias apresentadas pelos

componentes da fase sólida do solo (Meurer, 2017). A adsorção de P na fase sólida do solo tem sido descrita pelas isothermas Langmuir e de Freundlich. Estudos mostram que a capacidade máxima de adsorção do P (CMAP) em solos intemperizados da Paraíba não apresentou correlação elevada com o teor de argila. Todavia, em solos menos intemperizados, os valores de CMAP correlacionaram-se alta e positivamente com o teor de argila (Farias *et al.*, 2009). Em outro estudo, realizado com solos do Rio Grande do Sul, Ranno *et al.* (2007) encontraram correlação direta entre os teores de argila, Fe e matéria orgânica e a CMAP, demonstrando a influência da composição do solo na sorção de P. Pinto (2012), estudando solos do Cerrado, encontrou correlação positiva entre a capacidade máxima de adsorção do P (CMAP) e o fator capacidade de fósforo (FCP) com os atributos matéria orgânica (MO) e o teor de argila. Segundo este autor, a dessorção do P apresenta-se maior em solos com menor CMAP, ou seja, nos solos menos intemperizados.

O valor de dessorção máxima do P é afetado pela textura do solo. De acordo com Rheinheimer *et al.* (2003), a capacidade de extração e estimativa do fósforo disponível pelo extrator Mehlich-1 representou 32, 46 e 89% da dessorção máxima de fósforo para o solo muito argiloso, argiloso e arenoso, respectivamente. Em sentido contrário, os teores de argila se correlacionam positivamente com a capacidade máxima de adsorção de P (CMAP), corroborando com outros trabalhos que indicam alta sorção de P em solos argilosos.

A influência do teor de argila na disponibilidade (dessorção) do P em solos também foi estudada por Sandim *et al.* (2014). De acordo com os autores, o P extraído pela solução Mehlich-1 decresce com o aumento no teor de argila no solo, mesmo em solos submetidos à aplicação de calcário dolomítico e outros corretivos. O emprego dessa solução como extratora de fósforo, potássio, sódio e micronutrientes do solo baseia-se na solubilização desses elementos pelo efeito de pH, entre 2 e 3, sendo o papel do sulfato de restringir o processo de readsorção dos fosfatos recém-extraídos (Silva, 1991).

Os métodos usados na extração do P com resina trocadora de íons recomendam, na etapa que antecede a colocação da resina, acrescentar água destilada e uma bolinha de vidro junto com a amostra, fechar o frasco e, então, agitar durante quinze minutos para desagregar o solo. O método descrito por Camargo *et al.* (2009) recomenda agitar as amostras de solo a 200 rpm, enquanto o método descrito por Raji e Quaggio (2001) e Ferreira, Cruz e Ferreira Junior (1990) recomenda agitar a 220 rpm. Por outro lado, um estudo sobre a incubação de frações agregadas de solo, realizado por Wang (1997), sugere que triturar e agitar a amostra usada na análise pode subestimar a disponibilidade de P no solo porque sítios de ligação são expostos, aumentando a quimiosorção do P.

Assim, o objetivo desta pesquisa foi estudar o efeito de diferentes intensidades de oscilações por minuto (opm), no ajuste da mesa agitadora orbital, e avaliar o impacto do uso de uma esfera de vidro durante o processo de extração.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Os ensaios foram conduzidos no laboratório de Análise de Solos e Plantas do CETEC, entre os meses de junho de 2023 e junho de 2024, conforme descrito a seguir. A etapa de extração foi conduzida em mesa agitadora orbital programável, sendo utilizadas três repetições por tratamento. As amostras de terra dos solos foram secas em estufa a 40°C, destorroadas e passadas em peneira de 2 mm de abertura de malha, para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA). Embora o método descrito no *Manual de métodos de análise de solo* (Teixeira *et al.*, 2017) recomende tomar 5 g de solo (TFSA), nestes ensaios foram utilizadas amostras de 5 cm³, medidas em cachimbo coletor, a fim de facilitar a comparação com outros resultados descritos na literatura.

2.1 Efeito da agitação das amostras em função da profundidade

Foram utilizadas amostras de três horizontes de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (PVAd), proveniente do município de Visconde do Rio Branco (MG). Nas Tabelas 1 e 2 estão apresentados a composição granulométrica e o teor de carbono orgânico, por horizonte, e os resultados das análises químicas do solo. Os teores de argila correspondem aos descritos nas classes 15-35% e 35-60%, utilizadas para interpretação da disponibilidade de P, em função do teor de argila do solo (Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999).

Tabela 1. Composição granulométrica e teor de carbono orgânico em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (PVAd).

Horizonte	Profundidade (cm)	Granulometria (g Kg ⁻¹)			Classe Argila (%)	Carbono orgânico (g kg ⁻¹)
		Argila	Silte	Areia		
A	0 a 13	230	220	549	15-35	13,0
Bt ₁	32 a 70	349	466	185	15-35	4,0
Bt ₂	70 a 110	410	184	406	35-60	4,0

Autor: Francisco Fadigas

Tabela 2. Resultados das análises químicas de Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (PVAd).

Característica química	Amostra de solo		
	Horizonte		
	A (0-13 cm)	Bt ₁ (31-70 cm)	Bt ₂ (70-110 cm)
pH (H ₂ O)	5,4	5,3	5,0
P (mg dm ⁻³)	3	2	3
K (cmolc dm ⁻³)	0,15	0,03	0,03
Ca (cmolc dm ⁻³)	2,17	1,21	0,52
Mg (cmolc dm ⁻³)	1,46	0,67	0,86
Ca+ Mg (cmolc dm ⁻³)	3,62	1,88	1,39
Al (cmolc dm ⁻³)	0,1	0,1	0,4
Na (cmolc dm ⁻³)	0,02	0,02	0,03
Al + H (cmolc dm ⁻³)	2,67	1,34	1,95
SB ¹ (cmolc dm ⁻³)	3,80	1,93	1,45
CTC ² (cmolc dm ⁻³)	6,48	3,27	3,39
V ³ (%)	59	59	43
MO ⁴ (g kg ⁻¹)	24,9	5,80	5,3

Autor: Francisco Fadigas

Nota: ¹SB - soma de bases; ²CTC – capacidade de troca de cátions;
³V – saturação por bases; ⁴MO – matéria orgânica do solo

As amostras de terra foram agitadas em Erlenmeyer de 125 mL por 5 minutos, utilizando 50 ml de solução extratora Mehlich-1 (HCl 0,05 molL⁻¹ e H₂SO₄ 0,025 molL⁻¹). A agitação foi realizada com intensidades de 100, 120, 140, 160, 180, 200 e 220 oscilações por minuto (opm), seguida de um período de repouso de 14 a 16 horas. Posteriormente, 25 mL do extrato aquoso (sobrenadante), contendo o fósforo (P), foram pipetados e transferidos para tubos de centrifuga de 50 mL. Os tratamentos consistiram das combinações de opm e horizonte de solo, arranjados num esquema fatorial de 6x3.

As soluções padrão de P e do extrator foram preparadas segundo orientações contidas no *Manual de métodos de análise de solo* (Teixeira et al., 2017). Para o preparo das soluções foi utilizada água deionizada tipo II (condutividade elétrica < 1,0 µS cm⁻¹), e as vidrarias foram previamente descontaminadas com solução de HCl a 20%. As misturas para leitura das absorvâncias foram preparadas em tubo de vidro de 15 mL, com tampa rosqueada, contendo 2,5 mL do extrato de solo, 5,0 mL de solução de molibdato de amônio diluída e 15 mg de ácido ascórbico. Em seguida, as misturas foram transferidas para cubetas de vidro de 3,5 mL, com caminho ótico de 10 mm. As leituras foram efetuadas entre 40 e 60 min após a adição do ácido ascórbico, quando apresentavam a coloração definitiva (Santos; Silva; Griebeler, 2014; Silva, 2018).

Na obtenção das curvas de calibração, foram utilizadas soluções padrão contendo 1, 2, 3 e 4 mg L⁻¹ de P e as leituras foram realizadas a 660nm, em um espectrofotômetro UV-VIS. O ajuste do zero do aparelho foi obtido com a solução em branco, contendo o extrator Mehlich-1, molibdato de amônio diluído e ácido ascórbico (Teixeira *et al.*, 2017). Os valores das absorvâncias foram convertidos para teores de fósforo no solo pela equação: $y = ax$, onde y = absorvância das amostras; x = concentração de P (mg dm⁻³) e a = coeficiente angular da curva de calibração. O intercepto foi considerado na construção da curva, assumindo $b = 0$. Os resultados das medidas foram submetidos a uma análise de regressão utilizando a planilha eletrônica Excel (Microsoft Corporation, 2024) e os teores de P foram comparados entre intensidades de agitação (opm) dentro de cada horizonte. Para cada curva foi calculado o ponto de máxima disponibilidade (vértice) de P no solo.

2.2 Otimização da agitação em função do tipo de solo

Amostras de terra de diferentes classes de solo, contendo teores variados de argila, foram submetidas à agitação a 100, 120, 140, 160, 180, 200 opm em mesa agitadora orbital. As amostras foram agitadas, por 5 minutos, com 50 mL de solução Mehlich-1, sendo utilizadas três repetições por tratamento. Foram utilizadas amostras de solos representativos dos Tabuleiros Interioranos do Recôncavo Baiano, na profundidade de 0 a 20 cm, sendo estes: Cambissolo Háptico Ta Eutrófico leptofragmentário (CXve); Cambissolo Háptico Distrófico petroplíntico (CXbd); Argissolo Amarelo Distrófico típico (PAdx); Argissolo Acinzentado Distrocoeso típico (PACdx); Latossolo Amarelo Distrocoeso argissólico (LAdx2); Latossolo Amarelo Distrocoeso típico (LAdx1). Quatro das amostras foram coletadas em área da UFRB, e compõe uma topossequência situada às margens de uma das estradas de acesso ao açude, de área denominada cascalheira. Outras duas foram coletadas no NEAS (Núcleo de Engenharia de Água e Solo) e em uma encosta próxima a um plantio de eucaliptos. Nas Tabelas 3 e 4 são apresentadas algumas características físicas e químicas destes solos.

Tabela 3. Localização, composição granulométrica e teor de Carbono (C_{Org}) dos solos utilizados no estudo na camada de 0 a 20 cm de profundidade.

Solo	Localização		Granulometria (g Kg ⁻¹)			C _{Org} (g kg ⁻¹)
	(Coordenadas Geográficas)		Argila	Silte	Areia	
CXve	S 12°39'38,7"	W 039°04'41,3"	173	187	640	11,0
CXbd	S 12°39'40,5"	W 039°04'42,3"	468	103	429	12,8
PAdx	S 12°39'41,1"	W 039°04'43,0"	427	89	484	12,6
PACdx	S 12°39'42,1"	W 039°05'37,1"	191	128	681	10,8
LAdx2	S 12°39'42,4"	W 039°04'42,4"	243	118	639	13,0
LAdx1	S 12°39'19,5"	W 039°05'18,6"	283	72	645	6,0

Autor: Francisco Fadigas

Tabela 4. Resultados das análises químicas dos solos utilizados no estudo.

Característica química	Amostra de solo					
	CXve	CXbd	PAdx	PACdx	LAdx2	LAdx1
pH (H ₂ O)	4,3	4,5	4,3	4,6	5,2	4,4
P (mg dm ⁻³)	4,0	5,0	3,0	3,0	5,0	2,0
K (cmolc dm ⁻³)	0,2	0,18	0,20	0,12	0,14	0,04
Ca (cmolc dm ⁻³)	1,06	0,94	0,71	0,88	2,36	0,30
Mg (cmolc dm ⁻³)	0,90	0,64	0,58	0,50	0,90	0,18
Ca+ Mg (cmolc dm ⁻³)	1,96	1,57	1,30	1,38	3,26	0,48
Al (cmolc dm ⁻³)	1,2	1,0	1,5	0,7	0,2	0,9
Na (cmolc dm ⁻³)	0,05	0,03	0,05	0,04	0,02	0,03
Al + H (cmolc dm ⁻³)	4,17	3,96	4,15	3,41	2,88	2,16
SB ¹ (cmolc dm ⁻³)	2,21	1,78	1,55	1,54	3,42	0,55
CTC ² (cmolc dm ⁻³)	6,38	5,74	5,69	4,95	6,30	2,70
V ³ (%)	35	31	27	31	54	20
MO ⁴ (g kg ⁻¹)	12,7	13,0	13,8	14,0	19,3	9,3

Autor: Francisco Fadigas

Nota: ¹SB - soma de bases; ²CTC – capacidade de troca de cátions; ³V – saturação por bases;

⁴MO – matéria orgânica do solo

As soluções para extração e quantificação de P foram preparadas segundo orientações contidas no *Manual de métodos de análise de solo* (Teixeira *et al.*, 2017), sendo a curva padrão obtida com os padrões de concentração 0,5, 1, 1,5 e 2,0 mg L⁻¹ de P. As misturas para leitura das absorvâncias foram preparadas em tubo de vidro com tampa rosqueada contendo 2,5 mL do extrato de solo, 5,0 mL de solução de molibdato de amônio diluída e 15 mg de ácido ascórbico. As medidas da absorvância foram efetuadas entre 40 e 60 min após a adição do ácido ascórbico, sendo as leituras efetuadas a 660 nm, em espectrofotômetro.

Os resultados das medidas dos teores de P no solo foram submetidos a uma análise de regressão, utilizando a planilha eletrônica Excel (Microsoft Corporation, 2024). Os teores de P foram comparados entre os diferentes solos e foram calculados os pontos de máxima disponibilidade de elemento no solo em função da intensidade de agitação (opm).

2.3 Efeito do uso de uma esfera de vidro durante a agitação das amostras

Neste ensaio foram utilizadas as mesmas amostras de solo e a mesma metodologia de preparo das soluções para extração e quantificação de P descritas no ensaio anterior (seção 2.2).

As amostras de seis solos representativos dos Tabuleiros Interioranos do Recôncavo Baiano foram agitadas, por 5 minutos, com 50 ml de solução Mehlich-1 (HCl 0,05 molL⁻¹ H₂SO₄ 0,025 molL⁻¹). A etapa de extração foi conduzida em mesa agitadora orbital programável, na qual as amostras de terra foram submetidas à agitação de intensidade igual 120, 180 e 220 opm, com três repetições para cada tratamento. As intensidades de agitação foram combinadas com a presença e ausência de uma esfera de vidro de 2 cm de diâmetro, inserida junto à mistura solo e solução extratora, durante o processo de extração. Após a agitação, as esferas foram retiradas dos Erlenmeyer com auxílio de uma pinça.

Os valores de concentração de P no solo foram submetidos à análise de variância univariada (ANOVA), considerando como principais fontes de variação a intensidade de agitação e a presença ou ausência da esfera de vidro. A análise foi realizada utilizando o software Statistica v.7 (StatSoft, 2004). O fator “solo” não foi incluído na avaliação.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A extração de fósforo de amostras de solo, usando a solução extratora Mehlich-1 tem sido estudada e modificada, ao longo do tempo, desde sua versão original proposta por Mehlich (1953). Os resultados discutidos a seguir revelam o comportamento de amostras obtidas em diferentes horizontes do solo, como também de camada de 0 a 20 cm de diferentes solos dos Tabuleiros Interioranos Recôncavo Baiano.

3.1 Efeito da agitação na disponibilidade de P, em função da profundidade

A Tabela 5 apresenta os resultados da análise dos teores de P no solo em diferentes horizontes de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico coletado em Visconde do Rio Branco (MG). Observa-se que os teores de P (mg dm⁻³) aumentam em função da intensidade de agitação, atingindo um valor máximo de disponibilidade, seguido por uma redução a partir desse ponto. Estes resultados evidenciam que há um efeito positivo do aumento da intensidade de agitação das amostras sobre a dessorção do P contido no solo, quando se utiliza o extrator Mehlich-1 durante a extração do P.

Independentemente do horizonte de solo em análise ou do teor de argila presente em cada camada, o efeito observado mantém-se consistente, variando apenas o valor da intensidade de agitação (opm), que resulta na máxima disponibilidade do elemento (Figuras 1, 2 e 3). Estudo desenvolvido por Silva e Rajj (1996) concluiu que a disponibilidade de P no solo é mais bem estimada se considerados o pH e o teor de argila, e que teores de argila inferiores a 200 g kg⁻¹ não afetam significativamente

a extração pelos diferentes métodos testados. No presente estudo, embora os teores de argila tenham variado entre 230 e 410 g kg⁻¹, essa variação não alterou a tendência geral das curvas de desorção de P.

Os maiores valores para o teor de P foram observados no horizonte A (Tabela 5), possivelmente por apresentar maior teor de carbono (Eberhardt; Vendrame; Guimarães, 2008; Pinto, 2012), ou como efeito residual de usos anteriores da área. Todavia, os resultados deste estudo não permitem determinar se os menores teores de P disponível nos horizontes Bt1 e Bt2 são decorrentes da redução da eficiência do extrator, causada pelo aumento no teor de argila (Sandim *et al.*, 2014), ou pela composição natural dessas camadas do solo. De acordo com Raij *et al.* (1987), em solos muito argilosos, quando são utilizados extratores ácidos, os valores de concentração de P podem ser subestimados.

Tabela 5. Concentração de P¹ em amostras de Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (PVAd), em função da intensidade de agitação

Agitação (x10 ⁻²)	opm ²	Horizonte		
		A	Bt ₁	Bt ₂
Concentração de P (mg dm ⁻³)				
1,0	100	4,05	2,20	2,45
1,2	120	4,23	2,22	2,43
1,4	140	5,09	2,75	3,14
1,6	160	5,29	2,77	3,21
1,8	180	5,46	2,59	3,21
2,0	200	5,25	2,61	3,24
2,2	220	4,83	2,59	3,02

Autor: Francisco Fadigas

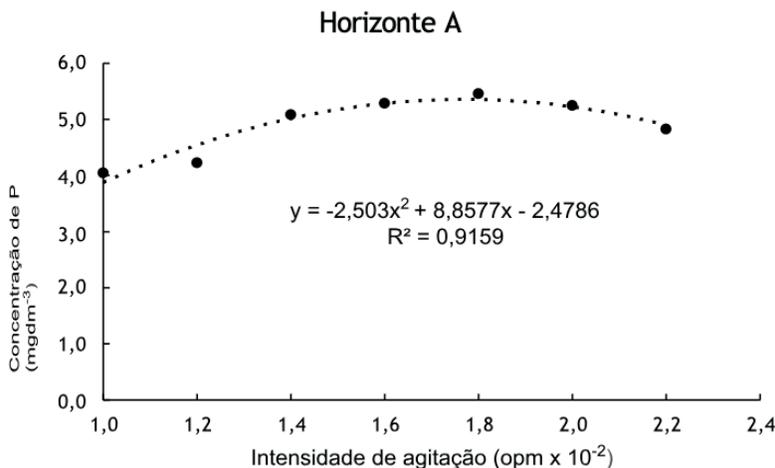
Nota: ¹ Leituras efetuadas em espectrofotômetro de absorção molecular a 660 nm

² opm - Oscilações por minuto

Este resultado também pode ser visualizado nas Figuras 1, 2 e 3. As equações de regressão quadráticas foram calculadas para cada horizonte do solo, mostrando claramente uma tendência para redução na quantidade de P extraído acima de 200 opm. O aumento da intensidade de agitação, acima desse valor, resultou em menores concentrações de P no extrato, o que, possivelmente, pode estar associado ao processo de readsorção do P na fase sólida do solo. É de consenso entre diversos autores que a disponibilidade do P nos solos é, em geral, muito baixa, além de que os solos brasileiros possuem alta capacidade de adsorção (Raij, 1991; Novais; Smyth, 1999). De acordo com Meurer (2007), os solos brasileiros contêm elevados teores de óxidos, principalmente de Fe, e em condições de acidez a superfície desses óxidos

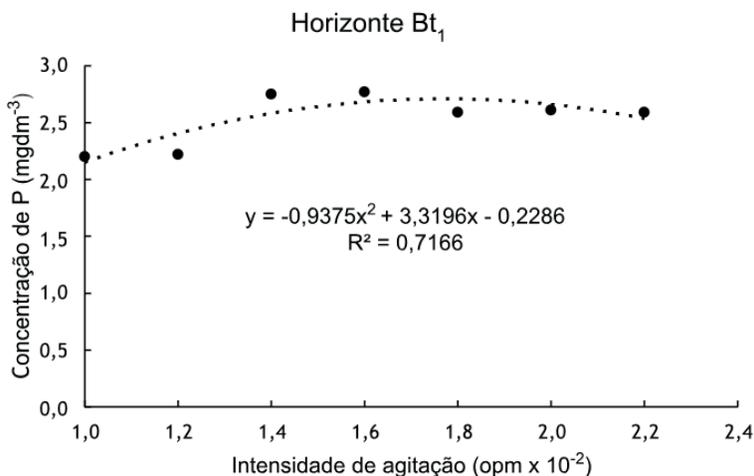
está carregada positivamente, atraindo ânions, como fosfatos, sulfato e molibdato. Na presença de óxidos de Fe, o ânion fosfato ($\text{PO}_4\text{-3}$) forma complexo de esfera interna com alta energia de ligação, o que é favorecido em condições de pH ácido (Meurer, 2017). Uma possibilidade a ser considerada é o surgimento de novas cargas positivas de superfície, durante a agitação, que poderia resultar na fixação do P recém extraído, por adsorção específica, também conhecida como quimissorção.

Figura 1. Teores de P (mg dm^{-3}) no horizonte A de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico, em função da intensidade de agitação (opm)



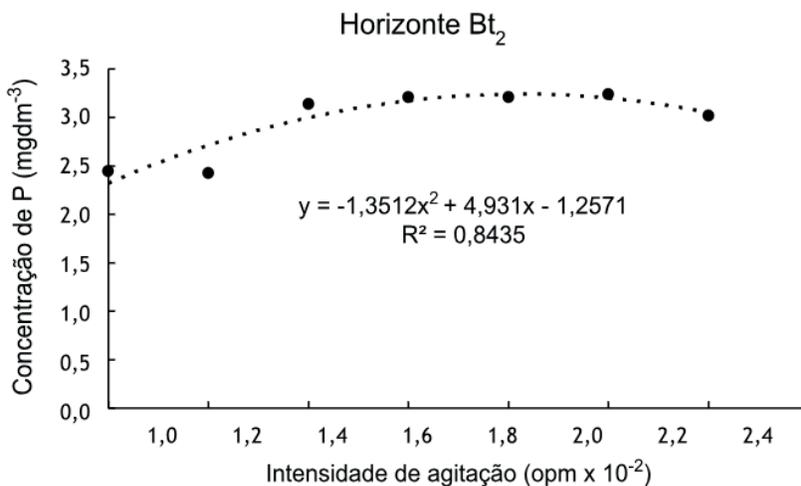
Autor: Francisco Fadigas

Figura 2. Teores de P (mg dm^{-3}) no horizonte Bt₁ de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico, em função da intensidade de agitação (opm)



Autor: Francisco Fadigas

Figura 3. Teores de P (mg dm⁻³) no horizonte Bt₂ de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico, em função da intensidade de agitação (opm)



Autor: Francisco Fadigas

Verificou-se que os teores de fósforo (P) obtidos com intensidades de agitação inferiores a 140 opm foram numericamente menores em comparação com aqueles alcançados na faixa entre 160 e 200 opm. As equações de regressão quadrática possibilitaram o cálculo dos pontos de máxima (PM), correspondentes aos vértices das funções, considerando a variável dependente y (teor de P) e a variável independente x (intensidade de agitação, em opm), conforme apresentado na Tabela 6. Com base nos resultados, identificou-se que a intensidade de 180 opm representa o ponto onde se obtém a maior quantidade de P disponível nas amostras dos horizontes do solo analisado.

Tabela 6. Valores dos pontos máximos (vértices) em X (opm) e Y (concentração de P), em função da intensidade de agitação, para as equações de regressão quadráticas de cada horizonte do PVAd.

Horizonte	Xv ¹	opm ²	Yv ³
A	1,77	177	5,36
Bt ₁	1,77	177	2,71
Bt ₂	1,82	182	3,24
Média	-	179	-

Autor: Francisco Fadigas

Notas: ¹ Xv = -b/2a

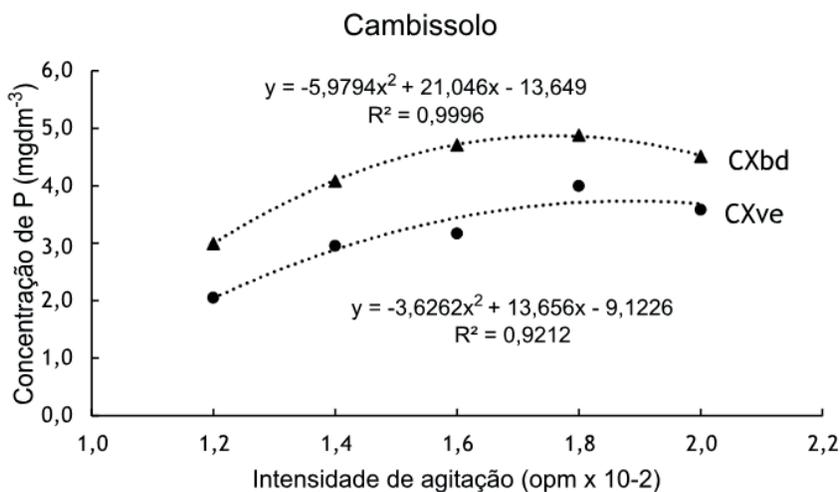
² opm - Oscilações por minuto

³ Yv = -(b² - 4ac)/4a

3.2 Efeito da agitação em relação aos teores de P em diferentes solos

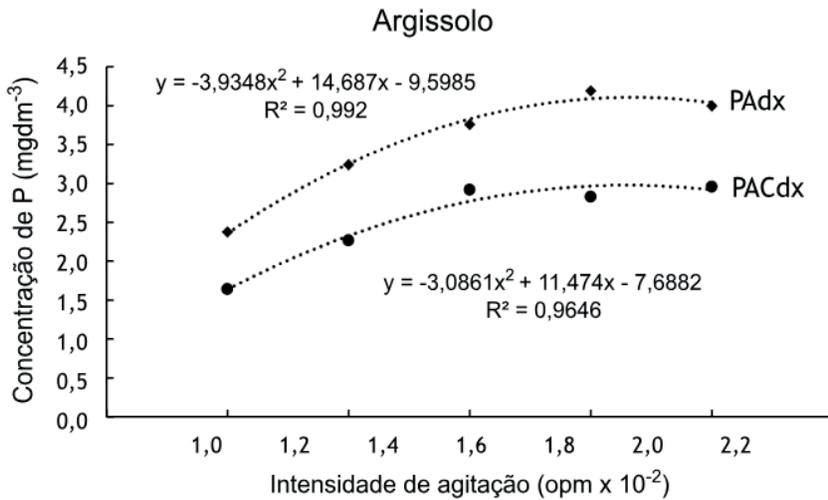
As Figuras 4, 5 e 6 apresentam os gráficos e as equações de regressão quadráticas obtidas para os solos estudados, agrupados conforme suas respectivas classes (Santos *et al.*, 2018). A análise gráfica permite concluir que os modelos matemáticos descrevem adequadamente o comportamento do teor de P, em função da intensidade de agitação. Em todos os casos, exceto no Latossolo Amarelo Distrocoeso típico (LAdx1), os valores dos coeficientes de determinação (R^2) estão acima de 0,9, indicando que as equações quadráticas ajustadas descrevem convenientemente o efeito da agitação na disponibilização do P contido nas amostras.

Figura 4. Disponibilidade de fósforo (P) em Cambissolos dos Tabuleiros Interioranos do Recôncavo Baiano, em função da intensidade de agitação durante a etapa de extração



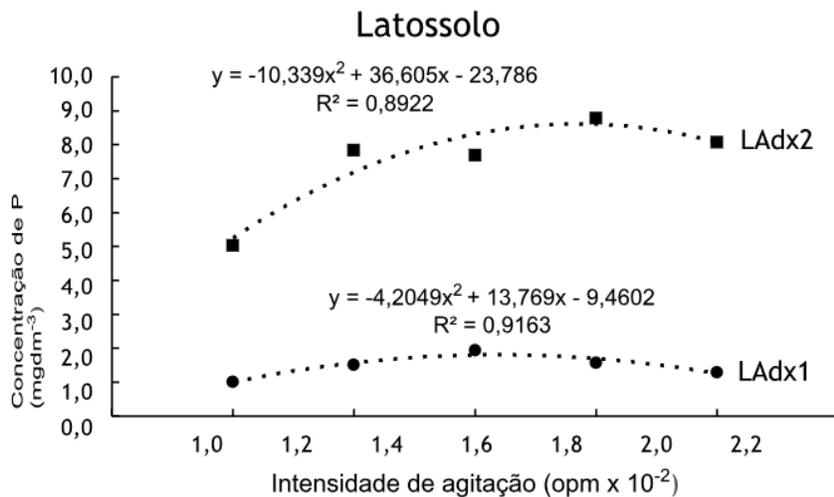
Autor: Francisco Fadigas

Figura 5. Disponibilidade de fósforo (P) em Argissolos dos Tabuleiros Interiores do Recôncavo Baiano, em função da intensidade de agitação durante a etapa de extração



Autor: Francisco Fadigas

Figura 6. Disponibilidade de fósforo (P) em Latossolos dos Tabuleiros Interiores do Recôncavo Baiano, em função da intensidade de agitação durante a etapa de extração



Autor: Francisco Fadigas

Os solos estudados, de modo geral, são de baixa fertilidade, fato comum nos solos de tabuleiro do Recôncavo Baiano (Moreau *et al.*, 2006; Carvalho; Nunes, 2022). As maiores quantidades de P disponível no extrato, ou seja, os pontos de máxima disponibilidade (PMx), foram registradas na faixa de 160 a 190 opm, nos solos estudados. O valor médio do ponto de máxima disponibilidade de P foi de 180 opm (Tabela 7). O aumento da intensidade de agitação além dessa faixa resultou em menores concentrações de P no extrato, reproduzindo a mesma tendência encontrada nos horizontes do Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (Tabela 5).

Tabela 7. Valores dos pontos máximos (vértices) em X (opm) e Y (concentração de P), em função da intensidade de agitação, para as equações de regressão quadráticas ($y = ax^2+bx+c$) de cada solo.

Solo	PMx ¹	opm ²	PMY ³
Cambissolo Háptico Ta Eutrófico leptofragmentário (CXve)	1,88	188	3,73
Cambissolo Háptico Distrófico petroplíntico (CXbd)	1,76	176	4,87
Argissolo Amarelo Distrófico típico (PAdx)	1,87	187	4,11
Argissolo Acinzentado Distrocóeso típico (PACdx)	1,86	186	2,98
Latossolo Amarelo Distrocóeso argissólico (LAdx2)	1,77	177	8,61
Latossolo Amarelo Distrocóeso típico (LAdx1)	1,64	164	1,81
Média	-	180	-

Autor: Francisco Fadigas

Notas: ¹PMx = $-b/2a$

²opm - Oscilações por minuto

³PMY = $-(b^2 - 4ac)/4a$

Como já discutido anteriormente, esses resultados podem ser atribuídos ao processo de readsorção do P na fase sólida do solo, durante o tempo decorrido entre a decantação das amostras e o momento em que são pipetados os extratos para análise do P. Broggi (2004), ao avaliar a disponibilidade de P em solos com diferentes composições mineralógicas observou maior adsorção em solos como Latossolo Amarelo distrófico (LAd), Latossolo Vermelho Amarelo distrófico (LVAd) e Nitossolo Vermelho distroférrico (NVdf). Segundo o autor, isto evidencia a elevada capacidade de adsorção de P em solos com predominância de gibbsita, goethita e hematita na fração argila, minerais que também estão presentes nos solos deste estudo. Por outro lado, em solos altamente intemperizados, de carga variável e ricos em argilominerais 1:1 e óxidos, quando o pH está abaixo do PCZ (ponto de carga zero) do solo, as cargas são predominantemente positivas, criando condições que favorecem a fixação dos fosfatos (Tiecher, 2015).

Considerando a média dos pontos de máxima (PMx) das equações quadráticas obtidas para os solos em estudo, pode-se concluir que 180 opm representa a intensidade ideal de agitação para obtenção da disponibilidade máxima de P no extrato, em solos com características similares ao deste estudo.

3.3 Impacto do uso de uma esfera de vidro na disponibilidade de P no solo

Os resultados da análise de variância (Tabela 8) indicaram que o uso da esfera de vidro durante o processo de obtenção do extrato contendo P a partir das amostras de solo não apresentou efeito significativo. Para os solos em estudo e nas condições experimentais adotadas, a presença da esfera de vidro não aumentou a disponibilidade de P no extrato de solo, sugerindo que esta prática não influenciou o processo de dessorção do P.

Um fator que pode estar relacionado à ausência de efeito do uso da esfera de vidro é o tempo de agitação de 5 min considerado no método de extração descrito no *Manual de métodos de análise de solo* (Teixeira *et al.*, 2017). Os métodos que recomendam a desagregação prévia das amostras de solo especificam uma agitação da mistura solo e água (1:10) durante 15 min (Raij *et al.*, 1987; Ferreira; Cruz; Ferreira Junior, 1990; Raij; Quaggio, 2001; Camargo *et al.*, 2009). Assim, é possível que uma agitação de apenas 5 minutos não seja suficiente para garantir a desagregação completa das partículas de solo.

Tabela 8. ANOVA - Efeito da intensidade de agitação e da presença (ou ausência) da esfera de vidro sobre a disponibilidade de P no solo

Efeito	Soma de Quadrados	Graus de liberdade	Quadrado Médio	F	p (significância)
opm ¹	42,179	2	21,089	4,5198	0,013
esfera ²	0,688	1	0,688	0,1474	0,702
opm*esfera	0,583	2	0,292	0,0625	0,939
Resíduo	475,936	102	4,666		

Autor: Francisco Fadigas. Notas: ¹ opm – Oscilações por minuto.

² Presença e ausência de uma esfera de vidro com 2 cm de diâmetro.

Os resultados deste ensaio também indicaram um efeito significativo da intensidade de agitação das amostras de solo durante o processo de extração. Embora algumas metodologias proponham agitações de 200 rpm a 250 rpm (Meneghetti, 2018; Sá; Guedes, 2023), as maiores médias para os teores de P no solo foram observadas com agitação a 180 opm (Tabela 9). Uma possível explicação para a ausência de aumento na disponibilidade de P a 220 opm pode estar relacionada

à formação de novos sítios de adsorção devido à agitação mais intensa (Wang, 1997). Estes sítios podem promover a readsorção do P previamente disponibilizado na solução, especialmente durante a etapa de decantação do extrato. A fração argila dos solos em questão é constituída por partículas pequenas como óxidos e oxihidróxidos os quais, uma vez dispersos, poderiam atuar na quimissorção do P liberado durante a agitação. Outra possibilidade é a de formação de compostos de baixa solubilidade entre o P e elementos como ferro e alumínio, que costumam ser abundantes em solos (Raij *et al.*, 1987).

Tabela 9. Comparação das médias obtidas para teor de P disponível no solo, em função da agitação e sem a presença da esfera de vidro.

Solo	P (mg dm ⁻³)		
	opm1		
	120 ²	180	220
Cambissolo Háplico Ta Eutrófico leptofragmentário (CXve)	3,6 ± 0,2	4,8 ± 0,2	4,3 ± 0,1
Cambissolo Háplico Distrófico petroplíntico (CXbd)	4,4 ± 0,2	5,8 ± 0,1	4,8 ± 0,0
Argissolo Amarelo Distrófico típico (PADx)	3,3 ± 0,1	4,6 ± 0,1	3,7 ± 0,1
Argissolo Acinzentado Distrocoeso típico (PACdx)	7,3 ± 0,6	9,4 ± 0,2	8,1 ± 0,5
Latossolo Amarelo Distrocoeso argissólico (LADx2)	1,0 ± 0,1	1,8 ± 0,1	1,0 ± 0,1
Latossolo Amarelo Distrocoeso típico (LADx1)	2,7 ± 0,1	3,9 ± 0,1	3,1 ± 0,1

Nota: ¹opm – Oscilações por minuto

²Média ± desvio padrão

4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados encontrados neste estudo, pode-se concluir que:

1. Em ambos os ensaios, as maiores quantidades de P disponível no extrato foram obtidas com agitação em torno de 180 opm, para os horizontes e solos estudados.
2. O aumento da intensidade de agitação, acima desse valor, resultou em menores concentrações de P no extrato.
3. Considerando a média dos pontos de máxima (PMx) das equações quadráticas, pode-se concluir que 180 opm representa a intensidade ideal de agitação para obtenção da disponibilidade máxima de P no extrato, em solos com características similares ao deste estudo.
4. O uso da esfera de vidro não teve efeito sobre a disponibilidade do fósforo no extrato do solo, independente da intensidade de agitação.

5. REFERÊNCIAS

BROGGI, F. **Adsorção e disponibilidade de fósforo em solos com diferentes composições mineralógicas**. 2004. 61 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2004.

CAMARGO, O. A. *et al.* **Métodos de Análise Química, Mineralógica e Física de Solos do Instituto Agrônomo de Campinas**. Campinas, SP: Instituto Agrônomo, 2009. 77 p. (Boletim técnico, 106, Edição revista e atualizada)

CARVALHO, C. C. N.; NUNES, F. C. Solos de tabuleiro do Recôncavo Baiano (Brasil): gênese, transformação e neotectonismo. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 8, n. 2, p. 114-125, 2022.

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais** - 5ª Aprox. Ribeiro, A. C.; Guimarães, P. T. G.; Alvarez V., V. H., Editores. Viçosa, MG: CFSEMG, 1999. 359p.

EBERHARDT, D. N.; VENDRAME, P. R. S.; GUIMARÃES, M. F. Influência da granulometria e da mineralogia sobre a retenção do fósforo em latossolos sob pastagens no cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p.1009- 1016, 2008.

FARIAS, D. R. *et al.* Fósforo em solos representativos do estado da Paraíba. I - isotermas de adsorção e medidas do fator capacidade de fósforo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, p.623-632, 2009

FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P da; FERREIRA JUNIOR, M. E. **Avaliação da fertilidade empregando o sistema IAC de análise de solo**. Jaboticabal, SP: FCAV, 1990. 94 p.

FREITAS, I. F. Fósforo extraído com resinas trocadoras de íons e Mehlich-1 de latossolos submetidos a fontes e doses de fósforo e tempos de contato. 2012. 42 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

MENEGHETTI, A. M. **Manual de procedimentos de amostragem e análise química de plantas, solo e fertilizantes**. Curitiba, PR: EDUTFPR, 2018. 252 p.

MEURER, E. J. Fatores que influenciam o crescimento e o desenvolvimento das plantas. *In*: NOVAIS, R. F. *et al.* (eds.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007.

MEURER, E. J. **Fundamentos de Química do Solo**. 6. ed. Porto Alegre: Evangraf, 2017.

MICROSOFT CORPORATION. **Excel**: software para planilhas eletrônicas. Office 365. Redmond: Microsoft, 2024.

MOREAU, A. M. S. S. *et al.* Caracterização de solos de duas toposequências em tabuleiros costeiros do sul da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 1007-1019, 2006.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa, MG: UFV, 1999. 399 p.

PINTO, F. A. **Sorção e dessorção de fósforo em solos de cerrado**. 2012. 46 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Goiás, Itajaí, 2012.

PRIMAVESI, A. C. Métodos de análise de solo. *In*: NOGUEIRA, A. R. A., SOUZA, G. B. (eds.). **Manual de Laboratório: Solo, água, nutrição vegetal, nutrição animal e alimentos**. São Carlos (SP): Embrapa Pecuária Sudeste, 2005. 334 p.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: CERES, 1991. 343p.

RAIJ, B. van *et al.* **Análise química de solos para fins de fertilidade**. Campinas, SP: Fundação Cargill, 1987. 170p.

RAIJ, B. van.; QUAGGIO, J. A. Determinação de fósforo, cálcio, magnésio e potássio extraídos com resina trocadora de íons. *In*: RAIJ, B. V. *et al.* (Org.). **Análise Química para Avaliação da Fertilidade de Solos Tropicais**. Campinas, SP: Instituto Agrônomo, 2001. p. 189-199.

RANNO, S. K. *et al.* Capacidade de adsorção de fósforo em solos de várzea no estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 21-28, 2007.

RAPOSO, R. W. C. **Metodologias para análise química da fertilidade e salinidade do solo e água**. Areia, PB: UFPB, 2014. 66p.

RHEINHEIMER, D. S. *et al.* Dessorção de fósforo avaliada por extrações sucessivas em amostras de solo provenientes dos sistemas plantio direto e convencional. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 6, p. 1053-1059, nov.-dez. 2003.

SÁ, L. P.; GUEDES, J. N. **Manual de rotina: um guia prático para análises de solos, água, tecido vegetal, biofertilizantes e corretivos**. Montes Claros, MG: Editora do IFNMG, 2023. 67 p.

SANDIM, A. S. *et al.* Phosphorus availability in oxidic soils treated with lime and silicate applications. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.38, p.1215-1222, 2014.

SANTOS, H. G. dos *et al.* **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

SANTOS, L. S.; SILVA, L. S.; GRIEBELER, G. Ácido ascórbico como agente redutor para a determinação de fósforo por colorimetria. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 44, n. 6, p. 1015-1018, 2014.

SILVA, F. C. da. **Avaliação da disponibilidade de fósforo por diversos extratores em solos cultivados com cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*)**. 1991. 165 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1991.

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

SILVA, F. C. *et al.* **Manual de métodos de para avaliação da fertilidade do solo**. Rio de Janeiro RJ: EMBRAPA-CNPQ, 1998. 56p. (EMBRAPA-CNPQ. Documentos, 3).

SILVA, F. C.; RAIJ, B. van. Disponibilidade de fósforo em solos avaliada, por diferentes extratores, em amostras de solos cultivados com cana-de açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, p. 83-90, 1996.

SILVA, S. B. **Análise de solos para ciências agrárias**. 2. ed. Belém, AM: Universidade Federal Rural da Amazônia, 2018. 167 p.

SKOOG, D. A.; WEST, D. M.; HOLLER, F. J.; CROUCH, S. R. **Fundamentos de Química Analítica**. Tradução da 8ª edição norte-americana. São Paulo (SP): Thomson, 2006. 999 p

STATSOFT, Inc. STATISTICA (data analysis software system), version 7. Tulsa, OK: StatSoft, 2004.

TEDESCO J. M. *et al.* **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre, RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p. (Boletim Técnico de Solos, 5).

TEIXEIRA, P. C. *et al.* **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017.

TIECHER, T. **A química antes da química do solo**. Porto Alegre, RS: URI – Frederico Westph, 2015. [recurso eletrônico].

VINHAL-FREITAS, I. C. *et al.* Adsorção e dessorção de metais no solo e coeficientes de isotermas de Freundlich e Langmuir. **Agropecuária Técnica**, Areia, v. 31, n. 2, 2010.

WANG, X. Phosphorus sorption, desorption and availability in oxisols and ultisols as influenced by soil aggregate size. 1997. Tese (Doutorado) – University of Hawai'i, Manoa, Havai, 1997.