







Availability and fractionation of phosphorus in soils with different physicochemical characteristics¹

Disponibilidade e fracionamento de fósforo em solos com características físico-químicas distintas

Djalma Silva Pereira¹^{2*}, Liovando Marciano da Costa³³, Davi Lopes do Carmo⁴⁴, Ana Caroline Teixeira Rocha⁵⁵

Abstract: The total content of phosphorus (P) within soil does not reflect its availability for plants, the available form depending on the physical and chemical characteristics of the soil. The aim was to evaluate the availability of P, using Mehlich-1 and Mehlich-3 extractors, and to determine the different forms of inorganic P in different classes of soils. Samples from horizon A of five soil classes from the municipality of Lagoa Formosa, Minas Gerais, were used: Typical Dystrophic Litholytic Entisol (RLd), Typical Dystrophic Red Oxisol (LVd), Typical Dystrophic Tb Hapludox Inceptisol (CXbd), Typical Acriferic Red Oxisol (LVwf), and Typical Chernossolic Litholytic Entisol (RLm). The levels of available P, remaining P, and total P were determined. From the fractionation of inorganic P, it was determined: soluble P ("P-H₂O"), P bonded to aluminum (P-Al), P bonded to iron (P-Fe), and P bonded to calcium (P-Ca). The Mehlich-1 and Mehlich-3 extractors had a high correlation coefficient, indicating that both methods could be used to extract available P from the soil. Mehlich-1 extracted more available P in the soil with a high calcium content (RLm). High levels of total P observed in LVwf and RLm were mainly due to the parent material of the soils. P-Fe and P-Al are the predominant inorganic P fractions in the most weathered (RLd, LVd, and LVwf) and acidic soils (CXbd). In RLm, the inorganic P is predominantly P-Ca.

Key words: Phosphorus extractors. Phosphorus available. Fractionation of inorganic phosphorus. Tropical soils.

Resumo: Considerando que o conteúdo total de fósforo (P) no solo não reflete sua disponibilidade para as plantas, sendo a forma disponível dependente das características físicas e químicas do solo, objetivou-se avaliar a disponibilidade de P, empregando os extratores Mehlich-1 e Mehlich-3; e determinar diferentes formas de P inorgânico em diferentes classes de solos. Utilizaram-se amostras do horizonte A de cinco classes de solos do município de Lagoa Formosa, Minas Gerais, sendo: Neossolo Litólico Distrófico típico (RLd), Latossolo Vermelho Distrófico típico (LVd), Cambissolo Háptico Tb Distrófico típico (CXbd), Latossolo Vermelho Acriférico típico (LVwf) e Neossolo Litólico Chernossólico típico (RLm). Determinaram-se os teores de P disponível, P remanescente e P total. A partir do fracionamento de P inorgânico, determinaram-se: P facilmente solúvel ("P-H₂O"), P ligado a alumínio (P-Al), P ligado a ferro (P-Fe) e P ligado a cálcio (P-Ca). Os extratores Mehlich-1 e Mehlich-3 tiveram alto coeficiente de correlação, indicando que ambos os métodos podem ser utilizados na extração de P disponível do solo. O Mehlich-1 extraiu mais P disponível no solo com alto teor de cálcio (RLm). Os altos teores de P total observados nos solos LVwf e RLm são decorrentes, principalmente, do material de origem. P ligado a Fe e Al são as frações de P inorgânico predominantes nos solos mais intemperizados (RLd, LVd e LVwf) e ácidos (CXbd). No RLm, o P inorgânico predomina na forma de P-Ca.

Palavras-chave: Extratores de fósforo. Fósforo disponível. Fracionamento de fósforo inorgânico. Solos tropicais.

*Corresponding author

Submitted for publication on 13/10/2020, approved on 17/11/2020 and published on 16/12/2020

¹Part of the doctoral thesis of the first author

²Doctoral candidate in Soils and Plant Nutrition, Soil Department, Universidade Federal de Viçosa; 35670-900, Avenida Peter Henry Rolfs, s/n - Campus Universitário - Viçosa - MG - Brazil. ORCID: 0000-0002-3977-7832. E-mail: djalma.pereira7@gmail.com

³Retired Professor of Soil, Universidade Federal de Viçosa. ORCID: 0000-0001-9581-0783. E-mail: liovandomc@yahoo.com.br

⁴Post-doctorate in Agroecology, Universidade Federal de Viçosa. ORCID: 0000-0001-9645-619X. E-mail: davigoldan@yahoo.com.br

⁵Undergraduate student of Agronomy of Universidade Federal de Viçosa. ORCID: 0000-0002-4768-4716. E-mail: anacaroline.rocha17@gmail.com

INTRODUCTION

Highly weathered tropical soils, such as Brazilian soils, when combined with high clay levels, have a high phosphorus (P) fixation capacity, reducing its availability for plants. Under natural conditions, these soils are generally acidic, with a low content of organic matter, basic cations and available P, as well as low cation exchange capacity (CEC) (MANGALASSERY *et al.*, 2019). The high capacity of P retention and fixation in these soils reduces its availability to plants (WITHERS *et al.*, 2018).

The P retention added to the soil occurs both by P precipitation in solution with ionic forms of iron (Fe), aluminum (Al), and calcium (Ca) and by its adsorption into Fe and Al oxides, present in greater quantities in the most weathered soils (NOVAIS; SMYTH, 1999). Thus, phosphate fertilization, associated with other management practices, such as liming, is essential to obtain high yields in these soils (WITHERS *et al.*, 2018). In soils with a low P content, high applications of this nutrient are common to reach a level of availability that allows the soil to be classified as non-deficient (RAIJ, 2011).

The soils of large productive areas in Brazil have received more phosphate fertilizers than necessary for the needs of crops since 1970, resulting in the accumulation of P reserves over time in forms of different lability, which may or may not meet the demand of plants (WITHERS *et al.*, 2018). The frequent application of phosphates into the soil results in the accumulation of labile and less labile forms of P over time. The labile fraction is represented by the set of phosphate compounds capable of quickly replenishing the soil solution, making it available to plants (RHEINHEIMER *et al.*, 2008). The frequent application of phosphates in the soil results in the accumulation of labile and less labile forms of P over time. The labile fraction is represented by the set of phosphate compounds capable of quickly replenishing the soil solution, making it available to plants (RHEINHEIMER *et al.*, 2008). Non-labile P formation occurs due to the formation of two coordination bonds with the colloid surface, which hinders the desorption of P for soil solution (NOVAIS; SMYTH, 1999). Given the P dynamic in the soil, it is difficult and complex to predict the availability of this nutrient for plants (ROGERI *et al.*, 2017).

Besides the evaluation of available P in soils, it is important to evaluate the forms of P that can replace the soil solution. Thus, for studies of the forms of P, according to their lability, methods were developed to quantify the labile P and other forms of less lability, using the sequential fractionation technique (GATIBONI *et al.*, 2013). Sequential chemical extraction of inorganic P from the soil is a useful approach to obtain detailed information on the potential availability of P in soil (SHAO *et al.*, 2019).

INTRODUÇÃO

Os solos tropicais muito intemperizados, como os solos brasileiros, aliados a altos teores de argila, têm alta capacidade de fixação de fósforo (P), o que reduz a disponibilidade para as plantas. Em condições naturais, esses solos são, geralmente, ácidos, com baixo teor de matéria orgânica, cátions básicos e P disponível, bem como baixa capacidade de troca catiônica (CTC) (MANGALASSERY *et al.*, 2019). A alta capacidade de retenção e fixação de P nesses solos reduz a sua disponibilidade para as plantas (WITHERS *et al.*, 2018).

A retenção de P adicionado ao solo ocorre tanto pela precipitação de P na solução em formas iônicas de ferro (Fe), alumínio (Al) e cálcio (Ca), como pela sua adsorção aos óxidos de Fe e Al, presentes em maiores quantidades nos solos mais intemperizados (NOVAIS; SMYTH, 1999). Deste modo, a adubação fosfatada, aliada a outras práticas de manejo, como a calagem, é essencial para a obtenção de altas produtividades nestes solos (WITHERS *et al.*, 2018). Em solos com baixo teor de P, são comuns aplicações elevadas deste nutriente para atingir um nível de disponibilidade que permita classificar o solo como não deficiente (RAIJ, 2011).

Os solos de grandes áreas produtivas do Brasil recebem mais fertilizantes fosfatados que o necessário para as necessidades das culturas desde 1970, resultando na acumulação de reservas de P ao longo do tempo em formas de diferentes labilidades, que podem ou não atender à demanda das plantas (WITHERS *et al.*, 2018). A frequente aplicação de fosfatos no solo resulta em acúmulo de formas lábeis e menos lábeis de P ao longo do tempo. A fração lábil é representada pelo conjunto de compostos fosfatados capazes de repor rapidamente a solução do solo, tornando-se disponível para as plantas (RHEINHEIMER *et al.*, 2008). O P não lábil ocorre devido à formação de duas ligações coordenadas com a superfície dos colóides que dificulta a desorção do P para solução do solo (NOVAIS; SMYTH, 1999). Dada essa dinâmica do P no solo, é difícil e complexo prever a disponibilidade deste nutriente para plantas (ROGERI *et al.*, 2017).

Além da avaliação de P disponível nos solos, é importante avaliar as formas de P que possam repor a solução do solo. Assim, para estudos das formas de P, de acordo com sua labilidade, foram desenvolvidos métodos para quantificar o P lábil e outras formas de menor labilidade, mediante a técnica de fracionamento sequencial (GATIBONI *et al.*, 2013). A extração sequencial do P inorgânico do solo é uma abordagem útil para obter informações detalhadas sobre o potencial de disponibilidade de P no solo (SHAO *et al.*, 2019).

For the fractionation of inorganic P in the soil, the procedures proposed by Chang and Jackson (1957) allow the determination of easily soluble phosphate and those linked to Al, Fe, and Ca (GATIBONI *et al.*, 2013). The P availability in soils is largely controlled by the distribution of its fractions; the fractions P-H₂O and P-Al is considered labile, according to the accessibility of the plant, while P-Fe and P-Ca, as non-labile fractions (ZHAO *et al.*, 2019). However, any of these fractions may exist in a more or less labile state, depending, mainly, upon the reaction time of phosphates and conditions of the soil (RAIJ, 2011).

In view of the above, this study aimed to evaluate the P availability, using Mehlich-1 and Mehlich-3 extractors, and different forms of inorganic P in five soil classes.

MATERIALS AND METHODS

Five soil classes from the municipality of Lagoa Formosa, Minas Gerais, Brazil, were selected for the present study. Samples of horizon A were collected from these soil classes including, Typical Dystrophic Litholytic Entisol (RLd), Typical Dystrophic Red Oxisol (LVd), Typical Dystrophic Tb Hapludox Inceptisol (CXbd), Typical Acriferic Red Oxisol (LVwf), and Typical Chernossolic Litholytic Entisol (RLm) (SOUZA, 2017). The sampled locations had no agricultural use. For soil collection, mini trenches were opened along low-traffic roads. Table 1 shows information concerning the sampled locations. Soil samples were submitted to physical and chemical characterization, following the methodologies described by Teixeira *et al.* (2017). Table 2 shows the obtained results.

For each soil, the levels of available P, remaining P, and total P were determined in triplicate. The available P contents were determined using Mehlich-1 (HCl 0.05 mol L⁻¹ + H₂SO₄ 0.0125 mol L⁻¹) (MEHLICH, 1953) and Mehlich-3 (NH₄F 0.015 mol L⁻¹ + CH₃COOH 0.2 mol L⁻¹ + NH₄NO₃ 0.25 mol L⁻¹ + HNO₃ 0.013 mol L⁻¹ + EDTA 0.001 mol L⁻¹) extractors (MEHLICH, 1984) at a soil-extractant ratio of 1:10 (5 cm³ of ADFE and 50 mL of extracting solution). The remaining P contents were determined in a solution of 75 mL of CaCl₂ 0.01 mol L⁻¹, containing 60 mg L⁻¹ of P, with the addition of 7.5 cm³ of soil (soil-extractant ratio of 1:10), according to Alvarez *et al.* (2000). The assessment of P in the extracts was conducted by colorimetry, according to Braga and Defelipo (1974). The total P levels were determined by ICP-OES (inductively coupled plasma) after acid digestion, using H₂SO₄ 1:1, according to procedures described in Teixeira *et al.* (2017).

Para o fracionamento de P inorgânico do solo, os procedimentos propostos por Chang e Jackson (1957) permitem determinar o fosfato facilmente solúvel e os ligados a Al, Fe e Ca (GATIBONI *et al.*, 2013). A disponibilidade de P nos solos é controlada, em grande parte, pela distribuição de suas frações, sendo as frações de “P-H₂O” e P-Al consideradas lábeis, de acordo com a acessibilidade das plantas, enquanto que o P-Fe e P-Ca são frações não lábeis (ZHAO *et al.*, 2019). Entretanto, qualquer uma dessas frações pode existir em estado mais ou menos lábil, dependendo, principalmente, do tempo de reação dos fosfatos e das condições existentes no solo (RAIJ, 2011).

Diante do exposto, objetivou-se avaliar a disponibilidade de P, utilizando-se os extratores Mehlich-1 e Mehlich-3, e diferentes formas de P inorgânico em cinco classes de solos.

MATERIAL E MÉTODOS

Cinco classes de solos do município de Lagoa Formosa, Minas Gerais (mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba) foram selecionadas para o presente estudo, que tiveram amostras do horizonte A coletadas: Neossolo Litólico Distrófico típico (RLd), Latossolo Vermelho Distrófico típico (LVd), Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico (CXbd), Latossolo Vermelho Acriférico típico (LVwf) e Neossolo Litólico Chernossólico típico (RLm) (SOUZA, 2017). Os locais amostrados não apresentavam uso agrícola. Para a coleta dos solos foram abertas mini trincheiras ao longo de estradas de baixo trânsito. Na Tabela 1, encontram-se informações dos locais amostrados. As amostras dos solos foram submetidas à caracterização física e química (Tabela 2).

Para cada solo, determinaram-se, em triplicata, os teores de P disponível, P remanescente e P total. Os teores de P disponível foram determinados pelos extratores Mehlich-1 (HCl 0,05 mol L⁻¹ + H₂SO₄ 0,0125 mol L⁻¹) (MEHLICH, 1953) e Mehlich-3 (NH₄F 0,015 mol L⁻¹ + CH₃COOH 0,2 mol L⁻¹ + NH₄NO₃ 0,25 mol L⁻¹ + HNO₃ 0,013 mol L⁻¹ + EDTA 0,001 mol L⁻¹) (MEHLICH, 1984), numa relação solo:extrator de 1:10 (5 cm³ de TFSA e 50 mL da solução extratora). Os teores de P remanescente foram determinados em solução de 75 mL de CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹, contendo 60 mg L⁻¹ de P, com adição de 7,5 cm³ de solo (relação solo:extrator de 1:10), conforme Alvarez *et al.* (2000). A avaliação de P nos extratos foi realizada por colorimetria, de acordo com Braga e Defelipo (1974). Os teores de P total foram determinados pelo ICP-OES – inductively coupled plasma (espectrometria de emissão óptica por plasma induzido) – após digestão ácida, utilizando-se H₂SO₄ 1:1, conforme procedimentos descritos em Teixeira *et al.* (2017).

Table 1 - The sampled locations in the municipality of Lagoa Formosa, Minas Gerais, Brazil**Tabela 1** - Locais de amostragem de solos no município de Lagoa Formosa, Minas Gerais

Soil	Horizon Depth A (cm)	Geographic Coordinates	Altitude (m)	Geological unit
RLd	20	X: 354153,37 Y: 7927405,63	853	Lagoa Formosa Formation
LVd	20	X: 383986,38 Y: 7926294,12	886	Eluvial-colluvial covers
Cxbd	5	X: 354153,37 Y: 7923179,44	847	Lagoa Formosa Formation
LVwf	52	X: 353390,67 Y: 7926050,50	928	Mata da Corda Group
RLm	46	X: 362621,72 Y: 7919872,49	924	Mata da Corda Group

RLd: Typical Dystrophic Litholytic Entisol, LVd: Typical Dystrophic Red Oxisol, Cxbd: Typical Dystrophic Tb Hapludox Inceptisol, LVwf: Typical Acriferic Red Oxisol, and RLm: Typical Chernossolic Litholytic Entisol.

Source: Souza (2017).

RLd: Neossolo Litólico Distrófico típico, LVd: Latossolo Vermelho Distrófico típico, Cxbd: Cambissolo Háptico Tb Distrófico típico, LVwf: Latossolo Vermelho Acriférico típico e RLm: Neossolo Litólico Chernossólico típico.

Fonte: Souza (2017).

Table 2 - Physical and chemical characteristics of horizon A of five soils collected in Lagoa Formosa, Minas Gerais, Brazil**Tabela 2** - Características físicas e químicas do horizonte A de cinco classes de solos coletados em Lagoa Formosa, Minas Gerais

Physical Characterization							
Soil	Coarse Sand	Fine Sand	Silt	Clay	⁽¹⁾ ADFE Texture	Sd	Pd
	g kg ⁻¹					g cm ⁻³	
RLd	92.20	89.98	342.37	475.45	Clay	1.04	2.61
LVd	213.09	270.15	77.04	439.72	Sandy Clay	1.23	2.56
Cxbd	58.00	19.00	359.00	564.00	Clay	1.03	2.71
LVwf	91.00	68.00	272.00	569.00	Clay	1.17	3.08
RLm	100.00	58.00	358.00	484.00	Clay	1.22	2.89
Chemical Characterization							
	pH		Δ pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	K
	H ₂ O	KCl		cmol _c kg ⁻¹			mg dm ⁻³
RLd	4.86	3.62	-1.24	1.17	0.81	4.40	101.66
LVd	5.46	4.07	-1.39	2.29	1.01	1.30	140.76
Cxbd	5.04	3.84	-1.20	0.17	0.01	3.40	89.93
LVwf	5.27	4.60	-0.67	0.99	0.70	0.40	58.65
RLm	5.84	4.42	-1.42	20.49	5.63	0.30	320.62

Continua...

	H+Al	TB	CEC	eCEC	BS	ASI	TOC
	cmol _c kg ⁻¹				%		g kg ⁻¹
RLd	7.14	2.24	9.38	6.64	23.88	66.27	3.04
LVd	6.22	3.66	9.88	4.96	37.04	26.21	22.73
Cxbd	6.44	0.41	6.85	3.81	5.99	89.24	6.28
LVwf	6.59	1.84	8.43	2.24	21.83	17.86	14.18
RLm	10.67	26.94	37.61	27.24	71.63	1.10	34.26

RLd: Typical Dystrophic Litholytic Entisol, LVd: Typical Dystrophic Red Oxisol, Cxbd: Typical Dystrophic Tb Hapludox Inceptisol, LVwf: Typical Acriferic Red Oxisol, RLm: Typical Chernossolic Litholytic Entisol, ADFE: Air-dried fine earth, Sd: Soil density, Pd: Particle density, TB: total bases, CEC: cation exchange capacity at pH 7, eCEC: effective cation exchange capacity, BS: base saturation, ASI: Aluminum Saturation Index, TOC: total organic Carbon.

(1) Textural classification according to the Brazilian Society of Soil Science (SBCS).

Source: Souza (2017).

RLd: Neossolo Litólico Distrófico típico, LVd: Latossolo Vermelho Distrófico típico, Cxbd: Cambissolo Háptico Tb Distrófico típico, LVwf: Latossolo Vermelho Acriférico típico e RLm: Neossolo Litólico Chernossólico típico, TFSA: terra fina seca ao ar, Ds: densidade do solo, Dp: densidade de partícula;

(1) Classificação textural de acordo com a Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SBCS).

Fonte: Souza (2017).

For the fractionation of inorganic P, the procedure proposed by Chang and Jackson (1957) was used, thus determining: soluble P (“P-H₂O”), P bonded to aluminum (P-Al), P bonded to iron (P-Fe), and P bonded to calcium (P-Ca). Samples of 0.5 g of ADFE were sequentially extracted with 25 mL of NH₄Cl 1 mol L⁻¹ (“P-H₂O” determination), 25 mL of NH₄F 0.5 mol L⁻¹ (P-Al determination), 25 mL of NaOH 0.1 mol L⁻¹ (P-Fe determination), and 25 mL of H₂SO₄ 0.25 mol L⁻¹ (P-Ca determination). The content of inorganic P in extracts was determined by ICP-OES.

The data obtained were submitted to Pearson’s linear correlation analysis at the level of 5% probability.

RESULTS

Table 3 shows the results obtained for the available, total, and remaining P. The levels of available P extracted by Mehlich-1 (M1) ranged from 0.72 to 503.22 mg dm⁻³, while the available P content extracted by Mehlich-3 (M3) showed a smaller variation between soils (0.60 to 212.42 mg dm⁻³). The levels of total P were quite variable among soils, with values between 87.01 and 7419.85 mg dm⁻³. Although the levels of total P and available P among soils varied widely, the levels of remaining P showed a small variation between soils (14.01 to 24.17 mg L⁻¹).

The results of the different forms of inorganic P (Pi) obtained after the chemical fractionation of soil samples were presented in Table 4, as well as the percentage of each form concerning the sum of each form of Pi.

Para o fracionamento do P inorgânico utilizou-se o procedimento proposto por Chang e Jackson (1957), determinando-se, assim: P facilmente solúvel (“P-H₂O”), P ligado a alumínio (P-Al), P ligado a ferro (P-Fe) e P ligado a cálcio (P-Ca). Para isso, amostras de 0,5 g de TFSA foram submetidas à extração, sequencialmente, com 25 mL de NH₄Cl 1 mol L⁻¹ (determinação de “P-H₂O”), 25 mL de NH₄F 0,5 mol L⁻¹ (determinação de P-Al), 25 mL de NaOH 0,1 mol L⁻¹ (determinação de P-Fe) e 25 mL de H₂SO₄ 0,25 mol L⁻¹ (determinação de P-Ca). O teor de P inorgânico nos extratos foi determinado pelo ICP-OES.

Os dados obtidos foram submetidos a análises de correlação linear de Pearson ao nível de 5% de probabilidade.

RESULTADOS

Na Tabela 3, encontram-se os resultados de P disponível, P total e P remanescente. Os teores de P disponível extraídos pelo Mehlich-1 (M1) variaram de 0,72 a 503,22 mg dm⁻³, por outro lado, os teores de P disponível extraídos pelo Mehlich-3 (M3) apresentaram variação menor entre os solos (0,60 a 212,42 mg dm⁻³). Os teores de P total foram variáveis entre os solos, com valores entre 87,01 e 7419,85 mg dm⁻³. Embora os teores de P total e P disponível tivessem variações amplas, os teores de P remanescente apresentaram menor variação entre os solos (14,01 a 24,17 mg L⁻¹).

Os resultados das diferentes formas de P inorgânico (Pi) obtidos após o fracionamento químico das amostras de solo encontram-se na Tabela 4, bem como o percentual de cada forma em relação somatório do Pi.

Table 3 - Available phosphorus contents, extracted by Mehlich-1 (M1) and Mehlich-3 (M3), total (total P), and remaining (P-rem) in horizon A of five soil classes

Tabela 3 - Teores de fósforo disponível, extraídos por Mehlich-1 (M1) e Mehlich-3 (M3), total (P total) e remanescente (P-rem) do horizonte A de cinco classes de solos

Soil	M1	M3	Total P	Ratio P available/total ⁽¹⁾	P-rem
	mg dm ⁻³			%	mg L ⁻¹
RLd	4.92	6.12	192.27	2.56	24.17
LVd	1.46	3.96	122.98	1.19	21.21
Cxbd	0.72	0.60	87.01	0.83	18.55
LVwf	3.36	5.45	2969.25	0.11	14.01
RLm	503.22	212.42	7419.85	6.78	20.93
Upper limit	503.22	212.42	7419.85	6.78	24.17
Inferior limit	0.72	0.60	87.01	0.11	14.01
Variation	502.50	211.82	7332.84	6.68	10.16

RLd: Typical Dystrophic Litholytic Entisol, LVd: Typical Dystrophic Red Oxisol, Cxbd: Typical Dystrophic Tb Hapludox Inceptisol, LVwf: Typical Acriferic Red Oxisol, and RLm: Typical Chernossolic Litholytic Entisol.

(1) Percentage of available P from M1 (official method of the State of Minas Gerais, Brazil) in relation to the total P.

RLd: Neossolo Litólico Distrófico típico, LVd: Latossolo Vermelho Distrófico típico, Cxbd: Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico, LVwf: Latossolo Vermelho Acriférrico típico e RLm: Neossolo Litólico Chernossólico típico.

(1) Porcentagem de P disponível pelo extraído pelo Mehlich-1 (método oficial do Estado de Minas Gerais) em relação ao P total.

Table 4 - Inorganic phosphorus fractionation (Pi) in horizon A and percentage of each fraction extracted in relation to Pi, in parentheses, of five soil classes

Tabela 4 - Fracionamento de fósforo inorgânico (Pi) em amostras do horizonte A e o percentual de cada fração extraída em relação ao Pi (valores entre parênteses), de cinco classes de solos

Soil	"P-H ₂ O"		P-Al		P-Fe		P-Ca		Pi	Pi/Pt
	mg dm ⁻³									
RLd	0.28	(0.53)*	13.90	(26.29)	37.15	(70.25)	1.55	(2.93)	52.88	0.28
LVd	4.20	(6.82)	22.69	(36.80)	33.41	(54.19)	1.35	(2.20)	61.65	0.50
Cxbd	3.14	(8.14)	11.68	(30.29)	23.08	(59.85)	0.66	(0.66)	38.56	0.44
LVwf	7.32	(1.87)	55.73	(14.14)	315.64	(80.64)	12.71	(12.71)	391.40	0.13
RLm	7.03	(0.11)	305.06	(4.84)	1935.06	(30.70)	4055.06	(64.34)	6302.21	0.85

RLd: Typical Dystrophic Litholytic Entisol, LVd: Typical Dystrophic Red Oxisol, Cxbd: Typical Dystrophic Tb Hapludox Inceptisol, LVwf: Typical Acriferic Red Oxisol, RLm: Typical Chernossolic Litholytic Entisol, "P-H₂O": soluble P, P-Al: P bonded to aluminum, P-Fe: P bonded to iron and P-Ca: P bonded to calcium. * values in % of each fraction extracted from P in relation to the sum of all forms of inorganic P (Pi).

RLd: Neossolo Litólico Distrófico típico, LVd: Latossolo Vermelho Distrófico típico, Cxbd: Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico, LVwf: Latossolo Vermelho Acriférrico típico e RLm: Neossolo Litólico Chernossólico típico, "P-H₂O" fósforo facilmente solúvel, P-Al: fósforo ligado a alumínio, P-Fe: fósforo ligado a ferro: P-Fe, P-Ca: fósforo ligado a cálcio. *Valores em % de cada fração extraída de P em relação ao somatório de todas as formas de P inorgânico (Pi).

The levels of “P-H₂O”, which corresponds to the inorganic P fraction that is soluble in water, were low in all soils, highlighting the RLm that presented only 0.11% of Pi (Table 4). The RLm also had the lowest percentage of P-Al, at only 4.84% of the Pi. The P-Fe content was higher in LVwf, corresponding to 80.64% of the Pi, while for RLm, this was only 30.7%. The levels of P-Ca were higher in RLm, 64.34% of the Pi, followed by LVwf (12.71% of Pi). For the other soils, the percentage of P-Ca in relation to the Pi was less than 3.00%.

The correlation coefficient between methods M1 and M3 was high ($r^2 = 0.99$ **), as seen in Table 5.

Os teores de “P-H₂O”, que corresponde à fração de Pi que é solúvel em água, foram baixos em todos os solos, destacando o RLm que apresentou apenas 0,11% do Pi (Tabela 4). O RLm, também, apresentou menor percentual de P-Al, com apenas 4,84% do Pi. O teor de P-Fe foi superior no LVwf, correspondendo a 80,64% do Pi, enquanto para o RLm foi de 30,7%. Os teores de P-Ca foram superiores no RLm, 64,34% do Pi, seguido do LVwf (12,71% do Pi). Para os demais solos, o percentual de P-Ca em relação ao Pi foi inferior a 3,00%.

O coeficiente de correlação entre os métodos M1 e M3 foi alto ($r^2 = 0,99$ **), conforme observado na Tabela 5.

Table 5 - Correlations between the available P by Mehlich-1 (M1) and Mehlich-3 (M3), remaining P (P-rem), total P, fractions of inorganic P (soluble P (“P-H₂O”), P bonded to aluminum (P-Al), P bonded to iron (P-Fe), and P bonded to calcium (P-Ca)) in samples of horizon A of five soil classes

Tabela 5 - Correlações entre o P disponível por Mehlich-1 (M1) e Mehlich-3 (M3), P remanescente (P-rem), P total, frações de P inorgânico [facilmente solúvel (“P-H₂O”), ligado a alumínio (P-Al), a ferro (P-Fe) e a cálcio (P-Ca)], em amostras do horizonte A de cinco classes de solos

Variables	M1	M3	P-rem	Total P	“P-H ₂ O”	P-Al	P-Fe
M3	0.99**						
P-rem	0.17 ^{ns}	0.17 ^{ns}					
Total P	0.92*	0.92*	-0.16 ^{ns}				
“P-H ₂ O”	0.50 ^{ns}	0.50 ^{ns}	-0.69 ^{ns}	0.73 ^{ns}			
P-Al	0.99**	0.99**	0.06 ^{ns}	0.97**	0.60 ^{ns}		
P-Fe	0.99**	0.99**	0.05 ^{ns}	0.97**	0.60 ^{ns}	0.99**	
P-Ca	0.99**	0.99**	0.20 ^{ns}	0.92*	0.51 ^{ns}	0.99**	0.99**

^{ns} not significant; * significant at 5%; **significant at 1%.

^{ns} não significativo; * significativo a 5%; ** significativo a 1%.

DISCUSSION

According to the classification proposed by Ribeiro *et al.* (1999), the available P contents using M1 for RLd, LVd, Cxbd, and LVwf soils were “very low”, while for RLm was “very good”. The expressive value of P available from RLm is related to the low degree of weathering and the parent material of this soil, which is derived from volcanic rocks of the Mata da Corda Group (alkaline and ultrabasic eruptive rocks), with the presence of apatite minerals in its composition (UHLEIN *et al.*, 2011). The available P content extracted by M3 in the RLm soil was also higher than the other soils, but it was lower than that obtained by M1 (Table 3). The variation between the highest and lowest P content extracted by M3 was smaller than that extracted by M1. It is possible that the M1 extractor overestimates the P content available in soils with a high Ca content, either naturally, as RLm (Table 2), or in soils with constructed fertility.

DISCUSSÃO

De acordo com a classificação proposta por Ribeiro *et al.* (1999), os teores de P disponível empregando M1 para os solos RLd, LVd, Cxbd e LVwf foram “muito baixos”, enquanto para o solo RLm foi “muito bom”. O expressivo valor de P disponível do RLm está relacionado ao baixo grau de intemperismo e ao material de origem deste solo, que é derivado de rochas vulcânicas do Grupo Mata da Corda (rochas eruptivas alcalinas e ultrabásicas), com presença de minerais apatitas na sua composição (UHLEIN *et al.*, 2011). O teor de P disponível extraído por M3 no solo RLm, também, foi superior aos demais solos, mas foi inferior ao obtido pelo M1 (Tabela 3). A variação entre o maior e o menor teor de P extraído por M3 foi menor em relação ao extraído pelo M1. É possível que o extrator M1 superestime o teor de P disponível em solos com elevados teores de Ca, seja naturalmente, como o RLm (Tabela 2), ou em solos de fertilidade melhorada ou construída.

The available P content extracted by M3 was higher in RLd, LVd, and LVwf soils, concerning to the M1, representing in percentage terms 19.69%, 63.01%, and 38.24%, respectively (Table 3). Bortolon *et al.* (2009), Bortolon *et al.* (2011), Rogeri *et al.* (2017), and Mumbach *et al.* (2018) also observed that the available P content extracted by M3 tends to be greater than that extracted by M1. The greatest efficiency of P by the M3 is due to the chemical characteristics of the extractor, which preferably extracts the P bonded to Fe and Al and, in a smaller proportion, the P bonded to Ca (BEEGLE, 2005). Unlike, in soils with high levels of Ca, such as RLm, M1 was more efficient in extracting P, for also extracting P-Ca. The content of available P extracted by M1 in RLm was 57.8% higher than that extracted by M3.

The M1 extractor (MEHLICH, 1953) follows the principle of solubilization, by H⁺ ions, of Ca phosphates and small portions of Al and Fe phosphates (BORTOLON *et al.*, 2009). The M1 is efficient in the extraction of P bonded to Ca; however, plants are less efficient at extracting P bonded to Ca. Moreover, the Brazilian soils are highly weathered, mostly with high levels of Fe and Al oxides predominant in the clay fraction, thus, there is a decrease in the predictive capacity of the method (BORTOLON *et al.*, 2009). Even with such limitations, M1 has been used as an official method in some Brazilian States, having a good ability to predict the P availability, except in soils in which natural phosphates and limestone have recently been applied (MUMBACH *et al.*, 2018).

For eliminating some of the problems with the M1 extractor solution, the M3 extractor for use in acid soils and soils that have received natural phosphates was proposed in the 1980s (GONÇALVES *et al.*, 2012). The M3 extractor has several advantages, including the increased extraction range, reduced analytical errors, and simultaneous extraction of multiple elements (SCHLINDWEIN; GIANELLO, 2008). Nevertheless, soil analysis laboratories in most parts of Brazil use the M1 extractor to determine the availability of P for crops (GONÇALVES *et al.*, 2012).

According to Mumbach *et al.* (2018), the adoption of a new methodology to estimate the availability of an element for plants should be supported by a wide field calibration, where the extracted contents are correlated with the performance of the plants. The M3 extractor has great potential to replace the M1 extractor, but this requires field calibration experiments using the method (MUMBACH *et al.*, 2018).

Os teores de P disponível extraídos pelo M3 foram maiores nos solos RLd, LVd e LVwf, em relação aos teores extraídos pelo M1, representando em termos percentuais 19,69; 63,01 e 38,24%, respectivamente (Tabela 3). Nos estudos de Bortolon *et al.* (2009), Bortolon *et al.* (2011), Rogeri *et al.* (2017) e Mumbach *et al.* (2018) também foram observados que o P extraído pelo M3 tende a ser maior que o extraído pelo M1. A maior eficiência do M3 se deve às características químicas do extrator, que extrai preferencialmente o P ligado a Fe e Al, e, em menor proporção, ao P ligado a Ca (BEEGLE, 2005). Para solos com altos teores de Ca, como o RLm, o M1 foi mais eficiente na extração do P, por também extrair P ligado a Ca. O teor de P disponível extraído pelo M1 no RLm foi 57,8% maior em relação ao extraído pelo M3.

O extrator M1 tem como princípio a solubilização, pelos íons H⁺, de fosfatos de Ca e pequenas porções de fosfatos de Al e Fe (BORTOLON *et al.*, 2009). O M1 é eficiente na extração de P ligado a Ca, entretanto, as plantas são menos eficientes em extrair P ligado a Ca. Aliado a isto, os solos brasileiros são altamente intemperizados, em sua maioria, com altos teores de óxidos de Fe e Al na fração argila, assim, ocorre diminuição da capacidade preditiva do método (BORTOLON *et al.*, 2009). Mesmo com tais limitações, o M1 tem sido usado como método oficial em alguns estados brasileiros, tendo boa capacidade de predição da disponibilidade de P, exceto em solos com aplicação recente de fosfatos naturais e calcário (MUMBACH *et al.*, 2018).

Para eliminar os problemas e algumas desvantagens da solução extratora M1 foi proposto, a partir da década de 1980, o extrator M3 para uso em solos ácidos e solos que receberam fosfatos naturais (GONÇALVES *et al.*, 2012). O extrator M3 apresenta diversas vantagens, incluindo maior alcance de extração, redução de erros analíticos e extração simultânea de múltiplos elementos (SCHLINDWEIN; GIANELLO, 2008). Ainda assim, os laboratórios de análise de solo na maior parte do Brasil preferem o extrator M1 para determinar a disponibilidade de P para as culturas (GONÇALVES *et al.*, 2012).

De acordo com Mumbach *et al.* (2018), a adoção de uma nova metodologia para estimar a disponibilidade de um elemento para as plantas deve estar respaldada numa ampla calibração de campo, onde os teores extraídos são correlacionados com o desempenho das plantas. O extrator M3 apresenta grande potencial para substituir o extrator M1. Contudo, é preciso a realização de experimentos de calibração de campo usando este método (MUMBACH *et al.*, 2018).

The variation in the total P values of soils is mainly due to the parent material. According to Shao *et al.* (2019), soil native P comes mainly from soil parent materials and is affected by climatic conditions. The highest values were found in RLm and LVwf soils (Table 3), which are soils of the Mata da Corda Group (UHLEIN *et al.*, 2011), whose soil P contents are derived from volcanic rocks. Soils derived from such rocks can present high levels of total P due to the presence of apatite minerals in the rocks. The RLd, LVd, and CXbd soils showed low levels of total P due to the parent material with low presence of minerals containing P, such as the rocks of the Lagoa Formosa Formation (siltstones, sandstones, claystones, among others) of the RLd and CXbd soils and the Eluvial-colluvial covers, derived from weathering products in the Tertiary (UHLEIN *et al.*, 2011) of the LVd soil.

The low proportion of P available by the M1 extractor towards the total P was expected since most of the P reserves in the soil are in non-labile form. Chemically, this is considered very stable and difficult to become available to plants, with the labile fraction (available) being less than 5% of soil P (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006). Even in RLm, which had the highest content of total P and available P, only 6.78% of the total P is available (Table 3).

Although the LVwf showed an expressive total P value, due to the parent material, only 0.11% of the total P is available through the M1 extractor. This fact can be attributed to the physical, chemical, and mineralogical characteristics of this soil, which presents a very advanced degree of weathering, high content of clay, predominating in its mineralogy kaolinite minerals, gibbsite, maghemite, and hematite in the clay fraction, and high amount of Fe_2O_3 (30.03%) in ADFE obtained by a sulfuric attack (SOUZA, 2017). In highly weathered soils, the P fixation is higher due to the higher precipitation of P with ionic forms of Fe and Al in the solution. Moreover, soils become more electropositive, with a greater capacity to adsorb and retain anions, such as phosphates, because of their adsorption to Fe and Al oxides (NOVAIS; SMITH, 1999).

The LVwf also had the lowest remaining P value (Table 3), indicating a high phosphate adsorption capacity, which is in accordance with the physical, chemical, and mineralogical characteristics of this soil. Although the LVd soil is very weathered, with the presence of Fe and Al oxyhydroxides in the clay fraction, it showed a high P value remaining, probably due to the high TOC content (Table 2). The higher the amount of organic matter, the lower the adsorption of phosphates by the action of the low molecular weight organic acids, which can block phosphate adsorption sites (DONAGEMMA *et al.*, 2008).

A variação dos valores de P total dos solos é devido, principalmente, ao material de origem. De acordo com Shao *et al.* (2019), o P nativo do solo é proveniente, principalmente, de materiais de origem do solo e é afetado pelas condições edafoclimáticas. Os valores mais elevados de P total foram encontrados nos solos RLm e LVwf (Tabela 3), que são do Grupo Mata da Corda, derivados de rochas vulcânicas (UHLEIN *et al.*, 2011), cujos teores deste elemento são derivados de minerais apatitas presentes nas rochas. Os solos RLd, LVd e CXbd apresentaram baixos teores de P total, devido ao material de origem com baixa presença de minerais contendo P, como as rochas da Formação Lagoa Formosa (siltitos, arenitos, argilitos etc.) dos solos RLd e CXbd e as Coberturas Elúvio-Coluvionares, derivadas de produtos do intemperismo no Terciário (UHLEIN *et al.*, 2011) do solo LVd.

A baixa proporção do P disponível pelo extrator M1 em relação ao P total, nesses solos, era esperado, já que maior parte das reservas de P no solo está na forma não lábil, e a fração lábil é menor que 5% (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006). Mesmo no RLm, que apresentou maiores teores de P total e P disponível, apenas 6,78% do P total se encontra na forma disponível (Tabela 3).

Embora o LVwf tenha apresentado expressivo valor de P total, apenas 0,11% do P total é disponível pelo extrator M1. Tal fato pode ser atribuído às características físicas, químicas e mineralógicas desse solo, que apresenta grau avançado de intemperismo, alto teor de argila, predominando na sua mineralogia de caulinita, gibbsita, maghemita e hematita e elevado teor de Fe_2O_3 (30,03%) na TFSA, obtido pelo ataque sulfúrico (SOUZA, 2017). Nos solos mais intemperizados, há maior fixação de P devido a maior precipitação do P em solução com formas iônicas de Fe e Al e, além disso, os solos tornam-se mais eletropositivos e com grande capacidade de adsorver e reter ânions, tais como os fosfatos, pela sua adsorção aos óxidos de Fe e Al (NOVAIS; SMITH, 1999).

O LVwf apresentou menor valor de P remanescente (Tabela 3), indicando grande capacidade de adsorção de fosfato, o que está de acordo com as características físicas, químicas e mineralógicas deste solo. O LVd, apesar de ser um solo muito intemperizado, com presença de oxihidróxidos de Fe e Al na fração argila, apresentou elevado valor de P remanescente, provavelmente devido ao alto teor de COT (Tabela 2). Quanto maior a quantidade de matéria orgânica, em geral, menor é a adsorção de fosfatos pela ação dos ácidos orgânicos de baixo peso molecular, que podem bloquear sítios de adsorção do fosfato (DONAGEMMA *et al.*, 2008).

The remaining P corresponds to the amount of P added that remains in the equilibrium solution after a defined time of contact between the soil and solution (ALVAREZ V. *et al.*, 2000). Thus, the lower its content, the greater the capacity of the soil to hold the P added to the solution. The remaining P depends upon the adsorption capacity of the soil, which, in turn, is dependent upon the texture, mineralogy of the clay fraction, and amount of organic matter (NOVAIS; SMYTH, 1999).

The studied soils exhibited high clay content (Table 2). If considering only the texture influence, it is expected that, due to the specific surface area difference between the texture fractions, the clay fraction has a higher phosphate adsorption capacity (DONAGEMMA *et al.*, 2008), thus all soils RLd, LVd, Cxbd, LVwf, and Rlm have a high phosphate adsorption capacity due to the high content and quality of the clay. Regarding the clay fraction mineralogy, the following minerals were found in the studied soils: illite and kaolinite in Cxbd, RLd, and Rlm; kaolinite, gibbsite, maghemite, and hematite in LVwf; and kaolinite, gibbsite and hematite in LVd (SOUZA, 2017). Therefore, it is expected that in soils with more oxidic mineralogy, there would be a higher P adsorption (NOVAIS; SMYTH, 1999) and a lower P available.

The low levels of “P-H₂O” are due to the low solubility of the P compounds in the soil and their high adsorption capacity for this element (RAIJ, 2011), which justifies the low levels of this fraction in the studied soils (Table 4). In their studies, Souza Júnior *et al.* (2012) also found low levels of “P-H₂O” in the analyzed soils, which reveals the strong interaction of P with the solid phase of the soil.

In acidic soils that are poor in Ca, most of the inorganic P forms precipitate with Al and, or Fe and are adsorbed specifically to the surface of mineral colloids, so that the P-Al and P-Fe fractions are those that are predominant (SOUZA JÚNIOR *et al.*, 2012). In fact, the largest proportions of Pi of these soils were the fractions linked to Fe and Al. The expressive value of P-Fe in LVwf is due to the chemical and mineralogical characteristics of this soil. According to the Brazilian Soil Classification System (SiBCS), the acrylic Red Oxisols have acrylic character and Fe₂O₃ contents of 180 g kg⁻¹ to <360 g kg⁻¹ in most of the first 100 cm of horizon B (EMBRAPA, 2018).

O P remanescente corresponde à quantidade de P adicionada que fica na solução de equilíbrio após um período de contato entre solo e solução (ALVAREZ V. *et al.*, 2000). Assim, quanto menor seu teor, maior é a capacidade do solo em reter o P adicionado na solução. O P remanescente depende da capacidade de adsorção de fosfatos do solo, que, está relacionado com a textura, a mineralogia da fração argila e a quantidade de matéria orgânica (NOVAIS; SMYTH, 1999).

Os solos estudados apresentaram alto teor de argila (Tabela 2). Considerando-se, apenas, a influência da textura, espera-se que, em razão da diferença de superfície específica entre as frações texturais, a fração argila tenha maior capacidade de adsorção de fosfatos (DONAGEMMA *et al.*, 2008). Assim, os solos RLd, LVd, Cxbd, LVwf e Rlm apresentam grande capacidade de adsorção de fosfatos devido aos elevados teores e qualidades da argila. Em relação à mineralogia da fração argila, nestes solos foram encontrados os seguintes minerais: illita e caulinita em Cxbd, RLd e Rlm; caulinita, gibbsita, maghemita e hematita em LVwf; e caulinita, gibbsita e hematita em LVd (SOUZA, 2017). Logo, espera-se que nos solos com mineralogia mais oxidica tenha maior adsorção de P (NOVAIS; SMYTH, 1999) e menor P disponível.

Os baixos teores de “P-H₂O” são decorrentes da baixa solubilidade dos compostos de P existentes no solo e da sua alta capacidade de adsorção para este elemento (RAIJ, 2011), o que justifica os baixos teores dessa fração (Tabela 4). Em seus estudos, Souza Júnior *et al.* (2012) também verificaram baixos teores de “P-H₂O” nos solos do presente estudo, o que revela a forte interação do P com a fase sólida do solo.

Nos solos ácidos e pobres em Ca, a maior parte do P inorgânico forma precipitados com Al e Fe e, ou, é adsorvida especificamente à superfície dos colóides minerais, de modo que as frações P-Al e P-Fe são as que predominam (SOUZA JÚNIOR *et al.*, 2012). Isso leva a supor que nos solos RLd, LVd, Cxbd e LVwf o P inorgânico esteja ligado a Fe e Al. De fato, as maiores proporções do Pi desses solos foram nas frações ligadas a Fe e Al. O valor expressivo de P-Fe do LVwf é devido às características químicas e mineralógicas deste solo. De acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), os Latossolos Vermelhos acriférricos possuem caráter ácido e teores de Fe₂O₃ de 180 g kg⁻¹ a < 360 g kg⁻¹ na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B (EMBRAPA, 2018).

The expressive value of P-Ca in RLm is also related to the characteristics of this soil. According to the SiBCS, Chernossolic Litholytic Entisol is a non-carbonate soil with a chernozemic A horizon, which is a relatively thick dark mineral horizon with a high base saturation and predominance of calcium and magnesium ions (EMBRAPA, 2018). The other soils presented low levels of P-Ca. According to Souza Júnior *et al.* (2012), in the highly weathered soils and in those less weathered with low values of pH and Ca^{2+} , most of the inorganic P occurs in the forms of P-Al and P-Fe. This explains why the RLd, soil with a low grade of weathering, presented fractions of inorganic P similar to the highly weathered soils.

The sum of the inorganic P fractions determined in this study was lower than the total P value. On China soils, Shao *et al.* (2019) also observed that the inorganic P content in the studied area was lower than the total P, representing 60 to 85% of the total P. It can be explained by the lack of residual and occluded P fractions predicted in the original procedure of Chang and Jackson (1957), as well as the organic P fractions. Such fractions were not determined because they were not labile and, consequently, of little importance for crops (ROCHA *et al.*, 2005).

The high correlation coefficient between the M1 and M3 extractors (Table 5) was also observed by Bortolon *et al.* (2009), Bortolon *et al.* (2011), and Mumbach *et al.* (2018). According to Bortolon *et al.* (2009), the high correlation indicates that the two methods can be used to extract P from the soil. Furthermore, it was observed, in the present study, that the M1 and M3 extractors were positively correlated with the same variables (total P, available/total P ratio, P-Ca, P-Fe, and P-Al). According to Mumbach *et al.* (2018), such results demonstrate that the extraction methods can be used to estimate the availability of P in soils, and the M1 extractor should be preferable, as it has extensive field calibration.

CONCLUSIONS

Mehlich-1 extracted more P available in the soil with a high Ca content (RLm);

The high levels of total P in RLm and LVwf are mainly due to the soil/parent material, and the available content depends upon the physical, chemical, and mineralogical characteristics of the soils;

Inorganic P fractions bonded to Fe and Al are predominant in the most weathered and acidic soils. The inorganic P fraction bonded to Ca is predominant in soils with high levels of Ca.

O expressivo valor de P-Ca no RLm também está relacionado às características desse solo. De acordo com o SiBCS, os Neossolos Litólicos Chernossólicos são solos sem caráter carbonático e com horizonte A chernozêmico, que é um horizonte mineral superficial, relativamente espesso, de cor escura, com alta saturação por bases, com predomínio do íon cálcio e/ou magnésio (EMBRAPA, 2018). Os demais solos apresentaram baixos teores de P-Ca. De acordo com Souza Júnior *et al.* (2012), nos solos mais intemperizados e naqueles menos intemperizados, com baixo valor de pH e de Ca^{2+} , a maior parte do P inorgânico ocorre nas formas de P-Al e de P-Fe. Isso explica por que o RLd, solo menos intemperizado, apresentou frações de P inorgânico semelhantes aos solos mais intemperizados.

O somatório das frações inorgânicas de P determinadas no presente estudo revelou-se inferior ao valor de P total. Em solos da China, Shao *et al.* (2019) também observaram que o conteúdo de P inorgânico foi inferior ao P total, representando de 60 a 85% do P total. Fato que pode ser explicado pela ausência das frações P residual e ocluso, previstas no procedimento original de Chang e Jackson (1957), e, também, do P orgânico. Tais frações não foram determinadas por serem não lábeis (ROCHA *et al.*, 2005).

O alto coeficiente de correlação entre os extratores M1 e M3 (Tabela 5) foram também verificados por Bortolon *et al.* (2009), Bortolon *et al.* (2011) e Mumbach *et al.* (2018). De acordo com Bortolon *et al.* (2009), a alta correlação indica que os dois métodos podem ser utilizados na extração de P no solo. Além disso, observou-se, no presente estudo, que os extratores M1 e M3 correlacionaram-se positivamente com as mesmas variáveis (P total, relação P disponível/total, P-Ca, P-Fe e P-Al). Segundo Mumbach *et al.* (2018), tais resultados demonstram que os métodos de extração podem ser utilizados para estimar a disponibilidade de P nos solos, devendo ser preferível o extrator M1, por apresentar extensa calibração de campo.

CONCLUSÕES

O Mehlich-1 extraiu mais P disponível no solo com alto teor de Ca (RLm);

Os altos teores de P total nos solos RLm e LVwf são decorrentes, principalmente, do material de origem, sendo o teor disponível dependente das características físicas, químicas e mineralógicas dos solos;

As frações de P inorgânico ligadas a Fe e Al são predominantes nos solos mais intemperizados e ácidos. A fração de P inorgânico ligado a Ca predomina em solos com teores elevados de Ca.

ACKNOWLEDGMENTS

To Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES and to (Conselho Nacional de Pesquisa - CNPq for their funding and granting scholarships. This study was financed in part by Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001.

AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq) pelo financiamento e concessão de bolsas de estudo. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

CITED SCIENTIFIC LITERATURE

ALVAREZ V. V. H.; NOVAIS, R. F.; DIAS, L. E.; OLIVEIRA, J. A. Determinação e uso do fósforo remanescente. **Boletim Informativo**, SBCS, v. 25, n. 1, p. 27-32, 2000.

BEEGLE, D. **Assessing soil phosphorus for crop production by soil testing**. In: SIMS, J. T. et al. (Ed.). *Phosphorus: agriculture and the environment*. Madison: SSSA, 2005. p. 123-144.

BORTOLON, L.; GIANELLO, C.; KOVAR, J. L. Phosphorus availability to corn and soybean evaluated by three soil-test methods for southern Brazilian soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 42, n. 1, p. 39-49, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103624.2011.528488>

BORTOLON, L.; GIANELLO, C.; SCHLINDWEIN, J. A. Avaliação da disponibilidade de fósforo no solo para o milho pelos métodos Mehlich-1 e Mehlich-3. **Scientia Agraria**, v. 10, n. 4, p. 305-312, 2009. DOI: <https://doi.org/10.5380/rsa.v10i4.14728>

BRAGA, J. M.; DEFELIPO, B. V. Determinação espectrofotométrica de fósforo em extratos de solo e material vegetal. **Revista Ceres**, v. 21, p. 73-85, 1974.

CHANG, S. C.; JACKSON, M. L. Fractionation of soil phosphorus. **Soil Science**, v. 84, p. 133-144, 1957.

DONAGEMMA, G. K.; RUIZ, H. A.; KER, J. C.; FONTES, M. P. F. Fósforo remanescente em argila e silte retirados de Latossolos após pré-tratamentos na análise textural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 4, p. 1785-1791, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000400043>

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. SANTOS, H. G. [et al.]. – 5. ed. rev. e ampl. – Brasília, DF: Embrapa, 2018. E-book: il. color.

GATIBONI, L. C.; BRUNETTO, G.; RHEINHEIMER, D. S.; KAMINSKI, J. Fracionamento químico das formas de fósforo do solo: Usos e limitações. In: ARAÚJO, A. P.; ALVES, B. J. R., eds. **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013. v. 8. p. 141-187.

GONÇALVES, G. K.; BORTOLON, L.; MEURER, E. J.; GONÇALVES, D. R. N.; SOUSA, R. O.; FAGUNDES, S. M. Extratores de fósforo para o arroz irrigado em solos adubados com fosfato natural reativo. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 11, n. 3, p. 196-204, 2012.

MANGALASSERY, S.; KALAIIVANAN, D.; PHILIP, P. S. Effect of inorganic fertilisers and organic amendments on soil aggregation and biochemical characteristics in a weathered tropical soil. **Soil and Tillage Research**, v. 187, p. 144-151, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.12.008>

MEHLICH, A. **Determination of P, Ca, Mg, K, Na and NH₄ by North Carolina Soil Testing Laboratories**. Raleigh: North Carolina State University, 1953.

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

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. UFLA, Lavras, 2006.

- MUMBACH, G. L.; OLIVEIRA, D. A.; 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**, v. 65, n. 6, p. 546-554, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/0034-737X201865060010>
- NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta sob condições tropicais**. Raleigh: Universidade Federal de Viçosa – North Carolina State University, 1999. 399p.
- RAIJ, B. V. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba, International Plant Nutrition Institute, 2011. 420p.
- RHEINHEIMER, D. S.; 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**, v. 38, n. 2, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782008000200049>
- RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, Viçosa: UFV, 1999. 359p.
- ROCHA, A. T. D.; DUDA, G. P.; NASCIMENTO, C. W.; RIBEIRO, M. R. Fracionamento do fósforo e avaliação de extratores do P-disponível em solos da Ilha de Fernando de Noronha. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, n. 2, p. 178-184, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662005000200005>
- ROGERI, D. A.; BORTOLON, L.; GIANELLO, C.; AMORIM, M. B. Remaining phosphorus content to determine phosphorus availability of the soils in Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 52, n. 12, p. 1203-1214, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2017001200009>
- SCHLINDWEIN, J. A.; GIANELLO, C. Doses de máxima eficiência econômica de fósforo e potássio para as culturas cultivadas no sistema plantio direto. **Revista Plantio Direto**, v. 85, p. 20-25, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782008000200049>
- SHAO, W.; ZHUB, J.; TENGA, Z.; ZHANG, K.; LIUA, S.; LIA, M. Distribution of inorganic phosphorus and its response to the physicochemical characteristics of soil in Yeyahu Wetland, China. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 125, p. 1-8, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.02.025>
- SOUZA JÚNIOR, R. F.; OLIVEIRA, F. H. T.; SANTOS, H. C.; FREIRE, F. J.; ARRUDA, J. A. Frações de fósforo inorgânico do solo e suas correlações com o fósforo quantificado por extratores e pelo milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 159-170, n. 1, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000100017>
- SOUZA, L. F. T. **Modelagem de Processos Erosivos em Área de Contatos Geológicos no Alto Paranaíba**. 144p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017.
- TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (Editores técnicos). **Manual de métodos de análise de solos**. 3.ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 574p.
- UHLEIN, A.; BAPTISTA, M. C.; SEER, H. J.; CAXITO, F. A.; UHLEIN, G. J.; DARDENNE, M. A. A Formação Lagoa Formosa, Grupo Bambuí (MG): sistema deposicional de leque submarino em bacia de ante-país. **Revista Geonomos**, v. 19, p. 163-172, n. 2, 2011.
- WITHERS, P. J.; RODRIGUES, M.; SOLTANGHEISI, A.; CARVALHO, T. S.; GUILHERME, L. R. G.; BENITES, V. D. M.; GATIBONI, L. C.; SOUSA, D. M. G.; NUNES, R. S.; ROSOLEM, C. A.; ANDREOTE, F. D.; OLIVEIRA JÚNIOR, A.; COUTINHO, E. L. M.; PAVINATO, P. S. Transitions to sustainable management of phosphorus in Brazilian agriculture. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, p. 25-37, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-20887-z>
- ZHAO, F.; ZHANG, Y.; DIJKSTRA, F. A.; LI, Z.; ZHANG, Y.; ZHANG, T.; LU, Y.; SHI, J.; YANG, L. Effects of amendments on phosphorous status in soils with different phosphorous levels. **Catena**, v. 172, p. 97-103, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.08.016>