

EFICIÊNCIA DE MÉTODOS ANALÍTICOS NA PREDIÇÃO DA DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO PARA ARROZ IRRIGADO EM SOLOS CATARINENSES

Marcia Aparecida Simonete^{(1)*}, Paulo Roberto Ernani⁽¹⁾, Letícia Moro⁽²⁾, Claudia Fernanda Almeida Teixeira-Gandra⁽³⁾ e Luciano Colpo Gatiboni⁽¹⁾

⁽¹⁾ Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Departamento de Solos, Lages, Santa Catarina, Brasil.

⁽²⁾ Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Departamento de Solos, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Lages, Santa Catarina, Brasil.

⁽³⁾ Universidade Federal de Pelotas, Centro de Engenharias, Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil.

* Autor correspondente.

E-mail: maapasi@ig.com.br

RESUMO

Os solos cultivados com arroz irrigado no Estado de Santa Catarina apresentam características mineralógicas e químicas distintas dos solos utilizados nos estudos de calibração do extrator Mehlich-1, para estimar a disponibilidade de fósforo do solo para as plantas. Desse modo, o objetivo deste trabalho foi avaliar a eficiência dos extratores Mehlich-1, Mehlich-3, Resina em lâminas, Olsen e EDTA na predição da disponibilidade P para plantas de arroz cultivadas em sistema de alagamento em solos representativos de lavouras orizícolas do Estado de Santa Catarina. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, com cinco solos oriundos de várias lavouras orizícolas, em 2014. Foram adicionados aos solos quatro concentrações de P, correspondendo a 0, ¼, ½ e 1,0 vez a quantidade de P para atingir 0,2 mg L⁻¹ de P na solução do solo (com base na capacidade de adsorção de cada solo). Foram usadas três repetições por tratamento, dispostas no delineamento completamente casualizado. Após cinco dias da adição dos níveis de P, as unidades experimentais constituídas por vasos de 8 L contendo 3,5 kg de solo seco foram amostradas para determinar o P disponível do solo por cinco métodos químicos. Na sequência, essas foram alagadas e cultivadas com seis plantas de arroz por 46 dias, quando se quantificaram a massa de matéria seca e o P absorvido pela parte aérea das plantas. A eficácia dos métodos Mehlich-1, Mehlich-3, Resina em lâminas, Olsen e EDTA foi avaliada por correlação linear entre a quantidade de P extraída dos solos e a quantidade absorvida pelas plantas. A quantidade de P absorvida pelas plantas de arroz

Recebido para publicação em 17 de dezembro de 2014 e aprovado em 13 de abril de 2015.

DOI: 10.1590/01000683rbc20140797

aumentou com o acréscimo das doses de P aplicadas, variando com o tipo de solo. A maior recuperação do P adicionado aos solos foi obtida pelo extrator EDTA, seguido pelo Olsen. O P extraído pelo EDTA e Mehlich-3 evidenciou melhor correlação com quantidade de P absorvida pelo arroz. O agrupamento dos solos segundo características relacionadas à adsorção de P no solo melhora a eficiência de todos os métodos em prever a disponibilidade de P em solos cultivados com arroz no sistema de inundação.

Palavras-chave: *Oryza sativa*, extratores de P, solos alagados.

ABSTRACT: EFFECTIVENESS OF CHEMICAL METHODS IN PREDICTING PHOSPHORUS AVAILABILITY TO FLOOD IRRIGATED RICE IN SOILS OF SANTA CATARINA STATE, BRAZIL

The soils used to grow irrigated rice in the State of Santa Catarina have different mineralogical and chemical characteristics from the soils used for calibration studies of the Mehlich-1 extractant, for estimating soil phosphorus availability to plants. Thus, the aim of this study was to evaluate the effectiveness of Mehlich-1, Mehlich-3, Resin, Olsen and EDTA extractants in predicting P availability to flood irrigated rice in soils of State of Santa Catarina. The experiment was carried out in a greenhouse in 2014 with five soils collected from croplands previously planted to rice. Four rates of P were applied to the soils, corresponding to 0, ¼, ½, and 1.0 times the amount of P needed to reach 0.2 mg L⁻¹ P in the soil solution (based on the maximum P adsorption capacity of each soil). Experimental units consisted of 8.0 L pots containing 3.5 kg of soil (dry base). Triplicates of each treatment were arranged in a completely randomized experimental design. Five days after mixing P with the soils, soil samples were collected to quantify P by five chemical methods (Mehlich-1, Mehlich-3, Resin, Olsen, and EDTA). The pots were then flooded and cultivated with six rice seedlings for 46 days. Shoot dry matter and P uptake were quantified. Linear correlations between P extracted from the soils and P taken up by the plants were used to evaluate the effectiveness of the chemical methods in predicting P availability. The amount of P taken up by rice plants varied according to soil type and increased with increases in the P rate. The EDTA method recovered the highest amount of P from the soils relative to the amount applied, followed by Olsen. Soil P extracted by EDTA and Mehlich-3 best correlated with the amount of P uptake by rice plants. Arranging soils according to their characteristics related to P adsorption improves the effectiveness of all methods in predicting P availability to rice cultivated in flood irrigated soils.

Keywords: *Oryza sativa*, soil P extractants, flooded soils.

INTRODUÇÃO

O Estado de Santa Catarina (SC) é o segundo maior produtor de arroz irrigado cultivado no sistema de alagamento, responsável por aproximadamente 9 % da produção nacional, com um dos maiores índices de produtividade do Brasil, 7,1 t ha⁻¹ (Conab, 2014). A produtividade do arroz depende, entre outros fatores, do manejo da adubação, que é responsável por aproximadamente 11 % do custo de produção da lavoura (IRGA, 2013).

Entre os elementos aplicados ao solo por meio dos fertilizantes, o P merece destaque pelo seu alto custo e pelas modificações que acontecem com esse nutriente nos solos de várzea, em razão da alternância nas condições de oxidação e redução, que determinam sua maior ou menor disponibilidade às plantas. Trabalhos de pesquisa têm demonstrado ausência de resposta da cultura do arroz irrigado à adubação fosfatada (Marchezan et al., 2007; Fidelis et al.,

2013), mesmo nas situações em que os teores de P no solo estão abaixo do nível crítico (Fidelis et al., 2013), indicando que existe uma parcela significativa de P no solo que é disponibilizada durante o alagamento e que não é quantificada pelos métodos químicos.

Solos bem-drenados frequentemente apresentam baixa disponibilidade de P às plantas por causa da tendência de esse elemento formar compostos estáveis de alta energia de ligação e baixa solubilidade com a fase sólida mineral do solo, principalmente com óxidos e hidróxidos de Fe e Al (Havlin et al., 2005). Em condições de alagamento, os fatores que controlam a disponibilidade de P nos solos sofrem modificações significativas, havendo aumento da disponibilidade para as plantas, tanto pelo aumento da concentração de P na solução do solo (Fageria et al., 2011) como pela sua maior difusão em direção às raízes, em virtude da máxima umidade volumétrica nos solos alagados (Costa et al., 2006).

Em razão da adsorção específica do P na superfície dos óxidos, à medida que ocorre redução dos óxidos férricos a óxidos ferrosos, o P adsorvido é liberado para a solução do solo (Peng et al., 2007; Fageria et al., 2011), sendo esse o principal fator considerado por inúmeros pesquisadores para explicar o aumento da disponibilidade de P em solos reduzidos (Gonçalves e Meurer, 2010). Ranno et al. (2007), avaliando a influência do alagamento na disponibilidade de P em solos de várzea do Rio Grande do Sul (RS), verificaram que o P ligado ao Fe é a principal forma de P inorgânico nos solos, que tem sua proporção aumentada com o alagamento do solo. Além disso, as reações de redução envolvem o consumo de H⁺, aumentando o pH da solução. Quando o pH da solução do solo for maior que o ponto de carga zero, aumenta a competição de íons OH⁻ e ânions orgânicos pelos sítios de adsorção, ocorrendo repulsão dos fosfatos com o consequente aumento da concentração de H₂PO₄⁻ e HPO₄²⁻ na solução (Sposito, 1989).

A baixa eficiência do método Mehlich-1 na determinação do P disponível para a cultura do arroz em solos alagados catarinenses também pode estar associada ao fato de que a atual recomendação de adubação fosfatada (CQFS-RS/SC, 2004) foi obtida a partir de estudos de calibração do extrator Mehlich-1 em Planossolos do RS (Gonçalves e Meurer, 2010). Entretanto, a utilização de outras classes de solos no cultivo do arroz em SC, a exemplo dos Gleissolos, Cambissolos e Organossolos (Embrapa, 2013), que apresentam características químicas, mineralógicas e morfológicas diferentes, provavelmente proporciona variações nas propriedades químicas e eletroquímicas da solução, e conseqüentemente, altera a disponibilidade de P de maneira diferenciada em relação aos Planossolos. Além disso, ao contrário do que ocorre com as culturas de sequeiro, a classe textural não é utilizada como parâmetro auxiliar na interpretação da disponibilidade de P extraída do solo pelo método Mehlich-1 (CQFS-RS/SC, 2004).

O objetivo deste trabalho foi avaliar a eficiência dos extratores Mehlich-1, Mehlich-3, Resina em lâminas, Olsen e EDTA na predição da disponibilidade P para plantas de arroz cultivadas em sistema de alagamento em solos representativos de lavouras orizícolas do Estado de Santa Catarina.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação, com temperatura média mantida entre 20 e 30 °C e umidade relativa do ar entre 70 e 90 %, de fevereiro a abril de 2014, no Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC). Foram utilizadas amostras de cinco solos representativos da

lavoura orizícola de alguns municípios catarinense: Organossolo Háptico sáprico típico (OXs), coletado em Jaguaruna; Gleissolo Háptico tb distrófico típico (GXbd), coletados em Gaspar (G) e em Itajaí (I); e Cambissolo Háptico tb distrófico típico (CXbd), coletados em Itajaí (I) e em Pouso Redondo (P).

Amostras da camada superficial (0-20 cm) dos solos foram expostas ao ar, destorroadas e passadas em peneiras de 2 mm de malha. Na sequência, foram coletadas subamostras para determinação de argila, silte e areia, segundo Embrapa (1997), e caracterização química, segundo Tedesco et al. (1995). Determinaram-se também a fração de Fe (óxidos de Fe de baixa cristalinidade) extraído com oxalato de amônio [(NH₄)₂C₂O₄.H₂O] 0,2 mol L⁻¹ a pH 6,0, no escuro, conforme Schwertmann (1964), e a capacidade máxima de adsorção de P (CMAP), por meio do ajuste de isoterma (Quadro 1).

Para quantificar a CMAP, as concentrações de P das soluções de equilíbrio foram escolhidas com base nos valores de P remanescente (P-rem) (Alvarez V et al., 2000). As concentrações de P utilizadas (mg L⁻¹) foram 0, 8, 12, 20, 30, 40, 50, 60, 70 e 80, para o solo GXbd-G com P-rem entre 30 e 44 mg L⁻¹; 0, 5, 10, 15, 25, 35, 50, 65, 80, 95 e 110, para o solo CXbd-I com P-rem entre 19 e 30 mg L⁻¹; e 0, 7,5, 15, 30, 45, 60, 75, 90, 110, 130 e 150, para os solos OXs, GXbd-I e CXbd-P com P-rem entre 10 e 19 mg L⁻¹. Os dados de P sorvido e P solução foram obtidos a partir da equação de Langmuir:

$$P_{\text{sorvido}} = (a \times b \times P_{\text{solução}}) / (1 + a \times P_{\text{solução}}) \quad \text{Eq. 1}$$

em que P_{sorvido} : quantidade de P adsorvido por unidade de massa de solo, em mg kg⁻¹; a : constante relacionada com energia de ligação, em mg L⁻¹; b : capacidade máxima de adsorção de P (CMAP), em mg kg⁻¹; e $P_{\text{solução}}$: concentração de P na solução em equilíbrio, em L mg⁻¹. Considerando os parâmetros a e b obtidos pela equação de Langmuir e o valor de P necessário para atingir 0,2 mg L⁻¹ de P na solução de cada solo, foram calculadas quatro concentrações de P para cada um dos cinco solos, que corresponderam a: 0, ¼, ½ e 1,0 vez a quantidade de P para atingir 0,2 mg L⁻¹. O valor de 0,2 mg L⁻¹ de P na solução é considerado suficiente para o crescimento satisfatório das culturas (Novais e Smith, 1999).

As quatro doses de P foram aplicadas a triplicatas de 3,5 kg de cada solo. Essas variaram de acordo com o tipo de solo e, em mg kg⁻¹ de P, corresponderam a 0; 28,7; 57,4; e 114,9, no OXs; 0; 14,61; 29,23; e 58,45, no GXbd-G; 0; 25,07; 50,14; e 100,28, no GXbd-I; 0; 16,24; 32,47; e 64,95, no CXbd-I; e 0; 28,26; 56,52; e 113,03, no CXbd-P. O P foi aplicado na forma de KH₂PO₄, cujo teor de K foi uniformizado em todas doses pela aplicação de KCl, de modo a complementar a diferença em relação à quantidade de K adicionada no maior nível de P para cada solo.

Quadro 1. Atributos das amostras dos solos da camada de 0-20 cm, originárias de lavouras cultivadas com arroz no sistema de alagamento no Estado de Santa Catarina

Atributo	OXs ⁽¹⁾	GXbd-G	GXbd-I	CXbd-I	CXbd-P
pH(H ₂ O)	5,6	4,7	4,6	5,0	4,8
Matéria orgânica (g kg ⁻¹)	218	42	35	16	23
P-rem (mg L ⁻¹) ⁽²⁾	13	34	15	27	18
CMAP (mg kg ⁻¹) ⁽³⁾	1450	419	849	693	823
a (mg L ⁻¹) ⁽³⁾	0,430	0,810	0,669	0,517	0,796
Fe _{ox6} (g kg ⁻¹) ⁽⁴⁾	3,76	1,10	1,84	1,25	1,82
P Mehlich-1 (mg L ⁻¹)	3,41	2,74	6,22	5,43	3,43
K ⁺ (cmol _c dm ⁻³) ⁽⁵⁾	0,83	0,30	0,89	0,46	0,67
Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³) ⁽⁶⁾	10,89	0,73	2,70	2,10	4,00
Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³) ⁽⁶⁾	4,71	0,72	1,42	0,95	1,56
Na ⁺ (cmol _c dm ⁻³) ⁽⁵⁾	0,05	0,05	0,05	0,08	0,05
Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³) ⁽⁶⁾	0,00	0,32	1,02	0,39	0,70
H+Al (cmol _c dm ⁻³) ⁽⁷⁾	10,90	10,58	15,40	9,70	9,70
CTC _{efetiva} (cmol _c dm ⁻³)	16,48	2,12	6,08	3,98	6,98
CTC _{pH7} (cmol _c dm ⁻³)	27,38	12,70	20,48	13,68	16,68
m (%)	0	15,09	16,91	9,80	10,02
Argila (g kg ⁻¹) ⁽⁸⁾	181	299	670	270	427
Silte (g kg ⁻¹) ⁽⁸⁾	73	371	271	386	291
Areia (g kg ⁻¹) ⁽⁸⁾	746	350	59	344	282

⁽¹⁾ OXs: Organossolo Háplico sáprico típico - Jaguaruna (28° 27' S, 49° 00' W); GXbd-G: Gleissolo Háplico tb distrófico típico - Gaspar (26° 57' S, 48° 57' W); GXbd-I: Gleissolo Háplico tb distrófico típico - Itajaí (26° 56' S, 48° 45' W); CXbd-I: Cambissolo Háplico tb distrófico típico - Itajaí (26° 56' S, 48° 45' W); CXbd-P: Cambissolo Háplico tb distrófico típico - Pouso Redondo (27° 14' S, 49° 58' W). ⁽²⁾ Fósforo remanescente (Alvarez V et al., 2000). ⁽³⁾ Parâmetros da isoterma de Langmuir, sendo CMAP a capacidade máxima de adsorção de P (parâmetro b) e a a constante relacionada à energia de adsorção. ⁽⁴⁾ Óxido de ferro livre extraído por oxalato a pH 6 (Schwertmann, 1964). ⁽⁵⁾ Extrator Mehlich-1. ⁽⁶⁾ Extrator KCl 1 mol L⁻¹. ⁽⁷⁾ Extrator Acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹ pH 7. ⁽⁸⁾ Método da pipeta (Embrapa, 1997).

Após cinco dias da adição dos tratamentos, as unidades experimentais foram amostradas, com objetivo de extrair o P por diversos métodos, e transferidas para vasos com capacidade de 8 L, tendo em seguida recebido água a fim de formar uma lâmina de 5 cm, que foi mantida durante todo o período de cultivo por meio de irrigações diárias com água destilada. Os vasos foram distribuídos de forma inteiramente casualizada, em bancadas em casa de vegetação.

Passados cinco dias da aplicação de água, foram semeadas 12 sementes pré-germinadas do cultivar de arroz SCS 115 CL. Seis dias após, foi realizado o desbaste, mantendo-se seis plantas por vaso; adicionaram-se 30 mg kg⁻¹ de N em cobertura, na forma de ureia. Posteriormente, realizou-se mais uma aplicação de N em cobertura, com a mesma dose, totalizando 60 mg kg⁻¹ de N. Após o desbaste, o arroz foi cultivado por um período de 40 dias, quando a parte aérea das plantas foi coletada com corte rente ao solo e seca em estufa à temperatura de 65 °C, por 72 h, para determinar a produção de matéria seca. Na sequência, o tecido vegetal foi moído e nele determinou-se o teor de P após digestão ácida, de acordo com o método descrito por Tedesco et al.

(1995). O P acumulado na parte aérea das plantas foi calculado a partir da matéria seca produzida por vaso e do respectivo teor de P dessa.

Nas amostras coletadas após a adição dos tratamentos, o P foi extraído do solo pelos métodos: Mehlich-1 (Mehlich, 1953), Mehlich-3 (Mehlich, 1984), Resina trocadora de ânions, em lâminas (Gatiboni, 2003), Olsen (Olsen et al., 1954) e EDTA (Labhsetwar e Soltanpour, 1985). O P do extrato alcalino do método de Olsen foi determinado de acordo com Dick e Tabatabai (1977), enquanto nos demais extratos (ácidos) esse foi determinado pelo método descrito por Murphy e Riley (1962).

Os teores de P determinados pelos extratores e o P absorvido pelas plantas de arroz, ambos como variáveis dependentes das doses de P aplicadas, foram submetidos à análise de regressão linear. A eficiência dos extratores foi avaliada por meio de correlação linear de Pearson entre os teores de P obtidos em cada extrator e as quantidades de P absorvidas pelas plantas. As análises estatísticas foram realizadas utilizando-se o *software* SAS[®] (SAS, 2005).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As quantidades de P absorvidas pelas plantas de arroz variaram com o tipo de solo e aumentaram linearmente com o incremento da dose de P aplicada, com magnitudes variáveis entre esses (Figura 1). No tratamento sem a aplicação de P, a absorção variou de 3,9 mg/planta no Gleissolo Háplico tb distrófico típico (GXbd-G) até 14,3 mg/planta; no Gleissolo Háplico tb distrófico típico-Itajaí (GXbd-I), correspondente a uma diferença média de 3,6 vezes entre esses. Mesmo na maior dose de P aplicada, os valores variaram entre 7,7 e 25,2 mg/planta, nos mesmos solos, com uma diferença de 3,3 vezes entre esses. Essa diferença na quantidade de P absorvida está provavelmente relacionada com a ampla diversidade nas características biológicas, químicas e físicas dos solos (Quadro 1), que determinam potenciais produtivos variáveis, cuja investigação não é o objetivo deste trabalho. Os incrementos lineares na quantidade de P absorvida (mg/planta) decorrentes da adição de P (mg/kg de solo), avaliados pelos coeficientes angulares das equações de regressão, variaram de 0,042 a 0,11 (Figura 1). É importante ressaltar que a quantidade de P absorvida continuou aumentando linearmente até a última dose aplicada, evidenciando que as plantas tinham capacidade de absorver P do solo até maiores concentrações do que as existentes. Gonçalves et al. (2012) e Silva et al. (2008) também observaram variações na quantidade de P absorvida pelas plantas em solos do RS cultivados com arroz irrigado, que chegou até 34 vezes (Silva et al., 2008), atribuídas às características dos solos e também às reações de redução de Fe.

O teor de P quantificado dos solos se elevou com o aumento da dose aplicada e variou entre os solos e os métodos de extração (Quadro 2). Por meio de ajuste dos dados no modelo de regressão linear, as equações obtidas indicaram que as maiores taxas de recuperação de P nos solos foram proporcionadas pelo extrator EDTA, seguido pelo Olsen. O método Mehlich-1, atualmente utilizado nos Estados do RS e SC, extraiu quantidades intermediárias na maioria dos solos, sendo, em geral, maiores que às extraídas pelos métodos Mehlich-3 e Resina. Esses resultados são concordantes com os obtidos por Silva et al. (2008), em trabalho com solos cultivados com arroz irrigado no RS, os quais observaram a mesma ordem de valores de P extraídos pelos métodos testados neste estudo. Gonçalves e Meurer (2010) também verificaram maiores valores de P extraídos pelo Olsen em solos de várzea do RS cultivados com arroz, seguido pelo Mehlich-1, Mehlich-3 e Resina em lâminas. Essas variações nas taxas de extração de P entre os métodos, entre os solos e dentro de cada solo podem ser atribuídas às características químicas e físicas inerentes a cada solo e às características químicas dos extratores.

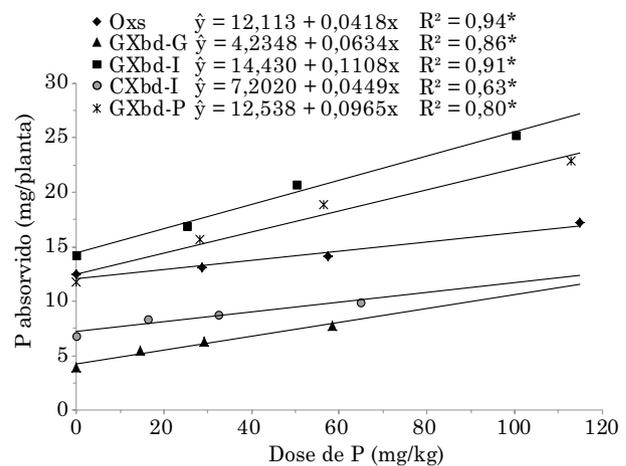


Figura 1. Fósforo absorvido pelas plantas de arroz irrigado nos diferentes solos de Santa Catarina em função da aplicação de doses de P. OXs: Organossolo Háplico sáprico típico - Jaguaruna; GXbd-G: Gleissolo Háplico tb distrófico típico - Gaspar; GXbd-I: Gleissolo Háplico tb distrófico típico - Itajaí; CXbd-I: Cambissolo Háplico tb distrófico típico - Itajaí; e GXbd-P: Cambissolo Háplico tb distrófico típico - Pouso Redondo. *: significativo a 5 %.

O EDTA foi o método que mais recuperou P do solo (Quadro 2). De acordo com as equações de regressão, o intervalo de recuperação do P aplicado em cada solo pelos métodos variou de 21 a 28 % para o EDTA, de 8 a 20 % para o Olsen, de 3 a 6 % para o Mehlich-1, de 2 a 6 % para o Mehlich-3 e de 1 a 3 % para a Resina trocadora de ânions (Quadro 2). As maiores taxas de recuperação de P do solo pelo EDTA e Olsen se devem, provavelmente, ao princípio de ação desses métodos. O EDTA é um extrator que ao complexar o Fe libera o fosfato dos grupos funcionais inorgânicos (Labhsetwar e Soltanpour, 1985), principalmente as formas de P influenciadas pela redução do solo, cuja fração Fe-P controla a maior parte do P disponível (Silva et al., 2008). Entretanto, a solução alcalina tamponada de NaHCO_3 0,5 mol L⁻¹ do método de Olsen, desenvolvida para solos calcários, tem por objetivo liberar P ligado a Fe (P-Fe) e Al (P-Al) em pH elevado, que também ocorre em solos cultivados com arroz após a inundação (Bortolon et al., 2014), onde o HCO_3^- substitui o fosfato adsorvido, reduzindo a atividade de Ca^{2+} em solução.

O extrator ácido Mehlich-1 extrai baixa quantidade de P dos solos de sequeiros com predominância de caulinita e de óxidos de Fe e Al na fração argila, uma vez que esse método dissolve predominantemente o P ligado ao Ca (P-Ca) e quantidades menores de P-Al e p-Fe, em razão das constantes de solubilidade desses três fosfatos (Bortolon e Gianello, 2008), sendo as quantidades de P extraídas por esse método normalmente inferiores às extraídas pelos métodos Mehlich-3 e Resina. (Bortolon e Gianello, 2008;

Quadro 2. Teores médios de P extraído por diferentes métodos e equações de regressão linear que relacionam o P extraído com as doses de P aplicadas, em solos originalmente cultivados com arroz irrigado no sistema de alagamento em Santa Catarina

Dose de P	Mehlich-1 ⁽¹⁾	Mehlich-3 ⁽²⁾	Resina ⁽³⁾	Olsen ⁽⁴⁾	EDTA ⁽⁵⁾
mg kg ⁻¹					
Oxs - Organossolo Háplico sáprico típico - Jaguaruna					
0,00	3,65	1,94	1,20	2,68	2,36
28,72	4,35	3,02	1,52	5,01	8,57
57,45	6,02	4,98	2,05	6,52	16,49
114,89	6,74	6,28	3,00	11,35	26,70
Equação	$\hat{y} = 3,788 + 0,0279 x$	$\hat{y} = 2,109 + 0,0387 x$	$\hat{y} = 1,141 + 0,016 x$	$\hat{y} = 2,644 + 0,075 x$	$\hat{y} = 2,805 + 0,213 x$
R ²	0,87*	0,96*	0,95*	0,98*	0,96*
GXbd-G - Gleissolo Háplico tb distrófico típico - Gaspar					
0,00	2,84	1,42	0,63	2,76	4,74
14,61	3,66	2,12	0,94	4,32	7,78
29,23	4,40	2,83	1,15	8,42	12,66
58,45	5,64	4,95	1,88	13,99	18,78
Equação	$\hat{y} = 2,919 + 0,0475 x$	$\hat{y} = 1,276 + 0,0608 x$	$\hat{y} = 0,606 + 0,021 x$	$\hat{y} = 2,271 + 0,199 x$	$\hat{y} = 4,729 + 0,224 x$
R ²	0,97*	0,96*	0,98*	0,97*	0,97*
GXbd-I - Gleissolo Háplico tb distrófico típico - Itajaí					
0,00	6,11	4,10	1,43	8,85	14,62
25,07	7,12	4,62	1,51	10,36	24,95
50,14	8,12	6,60	1,88	12,91	27,91
100,28	10,30	7,03	2,78	19,17	43,87
Equação	$\hat{y} = 6,079 + 0,0418 x$	$\hat{y} = 4,222 + 0,031 x$	$\hat{y} = 1,283 + 0,014 x$	$\hat{y} = 8,202 + 0,105 x$	$\hat{y} = 15,56 + 0,279 x$
R ²	0,98*	0,84*	0,94*	0,96*	0,97*
CXbd-I - Cambissolo Háplico tb distrófico típico - Itajaí					
0,00	5,42	1,93	2,35	8,72	6,15
16,23	6,25	1,96	2,86	11,61	11,90
32,47	7,62	2,43	3,26	14,20	15,25
64,94	9,05	3,81	4,23	19,81	23,78
Equação	$\hat{y} = 5,465 + 0,057 x$	$\hat{y} = 1,667 + 0,0304 x$	$\hat{y} = 2,359 + 0,0287 x$	$\hat{y} = 8,754 + 0,170 x$	$\hat{y} = 6,748 + 0,265 x$
R ²	0,90*	0,80*	0,96*	0,96*	0,99*
CXbd-P - Cambissolo Háplico tb distrófico típico - Pouso Redondo					
0,00	3,56	1,52	1,89	4,23	8,16
28,26	4,20	2,12	2,60	6,48	15,24
56,52	5,30	2,94	3,71	8,37	23,95
113,03	6,40	4,23	5,45	15,85	38,12
Equação	$\hat{y} = 3,595 + 0,0257 x$	$\hat{y} = 1,504 + 0,0242 x$	$\hat{y} = 1,862 + 0,032 x$	$\hat{y} = 3,634 + 0,101 x$	$\hat{y} = 8,156 + 0,267 x$
R ²	0,97*	0,96*	0,99*	0,96*	0,99*

⁽¹⁾ Mehlich (1953). ⁽²⁾ Mehlich (1984). ⁽³⁾ Gatiboni (2003). ⁽⁴⁾ Olsen et al. (1954). ⁽⁵⁾ Labhsetwar e Soltanpour (1985).

*: significativo a 5 %.

Wiatrak, 2013). Entretanto, em solos sazonalmente alagados, têm-se observado maiores extração de P pelo Mehlich-1 em relação a esses dois métodos (Silva et al., 2008; Gonçalves e Meurer, 2008), assim como o observado neste estudo. Isso pode estar associado ao fato de que o Mehlich-1 é um método composto por ácidos fortes, tendo maior agressividade que os demais na dissolução de compostos, principalmente os hidróxidos de Fe de baixa cristalinidade resultantes do alagamento. Desse modo, o Mehlich-1 poderia estar dissolvendo em maior quantidade esses compostos enquanto os outros, que agem por troca iônica (Resina) ou ácidos fracos + complexantes (Mehlich-3), apresentam menor capacidade de extração nessas condições.

As menores quantidades de P extraídas pelo Mehlich-3 podem também estar associadas à presença do F^- , que extrai preferencialmente o P-Al formando um complexo Al-F (Bortolon et al., 2009). Em estudo de fracionamento de P inorgânico em solos de várzea do RS, Ranno et al. (2007) não detectaram concentrações de P na forma de Al-P, fato atribuído às dificuldades na determinação desse fosfato pelo NH_4F , onde os compostos férricos do solo sorvem parte do P solubilizado durante a extração, e a maior contribuição relativa das formas de P-Fe e de P-Ca, diminuindo a importância relativa das formas de P-Al em solos de várzea. Desse modo, atribui-se a menor remoção de P pelo Mehlich-3 à baixa concentração de Al nos solos estudados (Quadro 1). Já a baixa quantidade de P extraída pela resina trocadora de ânions, também verificada por Gonçalves e Meurer (2008) e Silva et al. (2008) em solos de várzea do RS cultivados com arroz inundado, pode estar associada à menor contribuição de P-Al e de P-Ca, uma vez que esse método se correlaciona melhor com essas formas do que com P-Fe (Souza Júnior et al., 2012).

A maioria dos extratores recuperou menor quantidade de P no OXs, cuja taxa de recuperação foi aproximadamente de 2,8 % no Mehlich-1; 3,9 % no Mehlich-3; 1,6 % na Resina; 7,5 % no Olsen; e 21,3 % no EDTA (Quadro 2). Isso provavelmente ocorreu por ser o solo que apresentou maior teor de Fe_{ox6} , menor P-rem e alta CMAP (Quadro 1). Para os demais solos, a quantidade recuperada de P foi bastante variável, evidenciando que características químicas e físicas inerentes a cada solo influenciam o poder de recuperação dos extratores; concordantemente, as características químicas dos extratores também foram responsáveis pelas taxas de extração diferenciadas.

As correlações entre os teores de P no solo e as quantidades de P absorvidas pelo arroz para todos os solos apresentaram ampla variação (Figura 2). Boas correlações foram obtidas para o EDTA ($r = 82^{**}$) e o Mehlich-3 ($r = 0,67^{**}$); para o Mehlich-1 e a Resina, os coeficientes de correlação foram baixos ($r = 0,53^*$ e $r = 0,48^*$, respectivamente), enquanto

para o Olsen a correlação não foi significativa ($r = 0,38^{ns}$). A baixa correlação na estimativa da disponibilidade de P para as plantas pela maioria dos métodos pode estar relacionada à diversidade das características químicas, físicas e mineralógicas dos solos, bem como às formas e à dinâmica do P no solo após o alagamento.

O bom desempenho do método EDTA na predição da disponibilidade de P para o arroz cultivado em solos de várzea também foi observado por Silva et al. (2008), provavelmente em razão da complexação de Fe pelo EDTA, uma vez que o P aplicado nesses solos é lentamente convertido a formas ligadas ao Fe. Os óxidos amorfos de Fe são os principais componentes na adsorção de fosfato em solos oxidados (Moreira et al., 2006), podendo ser a forma predominante de liberação de P posteriormente ao alagamento (Ranno et al., 2007; Yang et al., 2012). O baixo coeficiente de correlação para o Mehlich-1 pode ser pelo fato de esse método extrair preferencialmente o P-Ca, que existe em pequenas quantidades nesses solos (Quadro 1), pelo consumo de íons H^+ e HSO_4^{2-} do extrator pelos grupos funcionais não ocupados pelo P e pela readsorção de P durante a extração, pois o SO_4^{2-} não consegue amenizar a exaustão do extrator em solos com alto teor de óxidos na fração argila, fazendo com que as quantidades extraídas sejam menores (Tedesco et al., 1995). Para minimizar esse problema, os solos são separados em classes de argila para a interpretação do P extraído pelo Mehlich-1 nas culturas de sequeiro nos Estados do RS e SC (Bortolon e Gianello, 2008; Schindwein e Gianello, 2009). Esse procedimento, no entanto, não é utilizado na interpretação dos teores de P em solos alagados (CQFSRS/SC, 2004).

O método de Olsen não foi eficiente para prever a disponibilidade de P, fenômeno também observado por Hernández et al. (2013) para o arroz cultivado por inundação 43 solos uruguayos. Esse método foi desenvolvido para extrair P de solos com pH alto, o que favorece a extração do P-Fe e P-Al (Olsen et al., 1954), condição que acontece nos solos após o alagamento (Gonçalves e Meurer, 2010). Resultados opostos para essa mesma cultura foram observados por Zhang et al. (2006) e Lan et al. (2012).

Em dois solos (GXbd-G e CXbd-I), as plantas de arroz absorveram menor quantidade de P que nos demais; isso contribuiu para determinar os baixos coeficientes de correlação para o grupo total de solos (Figura 2). Esses dois solos apresentam características similares relacionadas à adsorção de P, como menor CMAP, menor teor de Fe_{ox6} , menor teor de argila (entre solos minerais) e maior quantidade de P-rem que os outros (Quadro 1). Os óxidos de Fe de baixa cristalinidade são substrato para bactérias anaeróbias durante a redução de óxido férrico a ferroso, aumentando a solubilidade do Fe^{2+} , indiretamente os teores de P na solução (Munch e Ottow, 1980). Desse modo, os solos

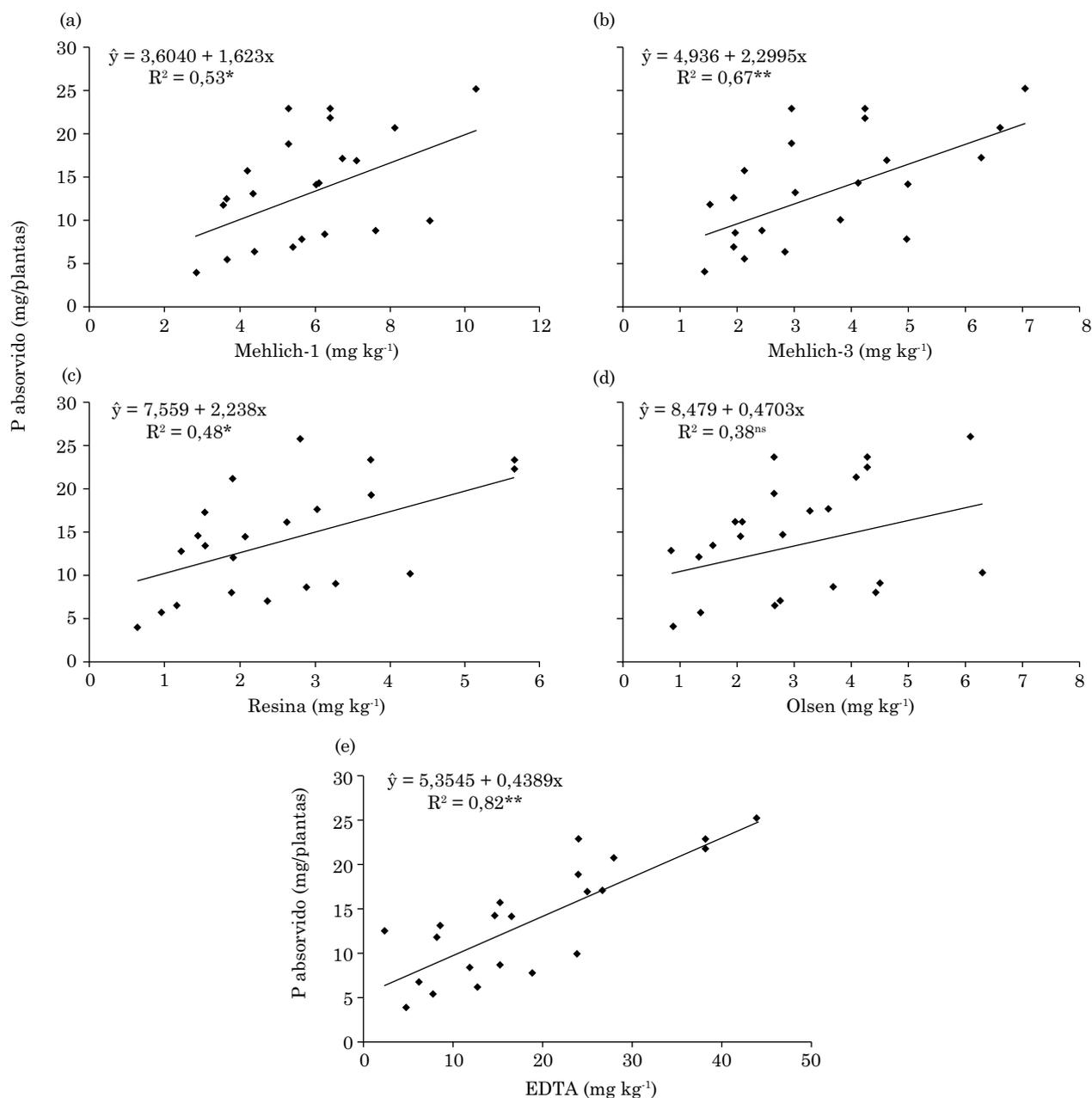


Figura 2. Correlação linear entre a quantidade de P absorvida pelo arroz e os teores de P extraídos dos cinco solos pelos métodos Mehlich-1 (a), Mehlich-3 (b), Resina (c), Olsen (d) e EDTA (e). ns: não significativo; * e ** significativo a 5 e 1 % de probabilidade, respectivamente.

Oxs, GXbd-I e CXbd-P, que apresentaram maiores teores dessa forma de Fe (Quadro 1), podem ser indicadores de aumento da disponibilidade de P com a redução no solo.

Quando os solos foram separados em dois grupos, as análises de correlação entre o teor de P extraído pelos métodos e a quantidade de P absorvida pelas plantas apresentaram coeficientes de correlação linear simples bem maiores do que aqueles obtidos para o grupo total (Quadro 3). Melhorias na eficiência de métodos químicos na avaliação da

disponibilidade de P para plantas de arroz cultivados em várzeas do RS também foram obtidas quando os solos foram separados em dois grupos, de acordo com o material de origem e os teores óxidos de Fe de baixa cristalinidade (Gonçalves e Meurer, 2008). A separação dos solos de várzea em grupos, de acordo com atributos relacionados com a adsorção de P, com o objetivo de melhorar a capacidade do método de Mehlich-1 em prever a disponibilidade de P para plantas de arroz no Estado do Rio Grande do Sul já havia sido proposta por Silva et al. (2008).

Quadro 3. Coeficiente de correlação linear (r) entre o teor de P extraído dos solos pelos diferentes métodos e a quantidade de P absorvida pelas plantas de arroz, para os solos separados em grupos de acordo com as características relacionadas à adsorção (capacidade máxima de adsorção de P, óxido de ferro livre extraído por oxalato a pH 6, P remanescente e argila - entre solos minerais)

Método	Grupo de solo ⁽¹⁾	
	1 ⁽²⁾	2 ⁽³⁾
Mehlich-1	0,82**	0,82**
Mehlich-3	0,68**	0,68*
Resina	0,64**	0,64*
Olsen	0,94**	0,93**
EDTA	0,96**	0,96**

⁽¹⁾ Grupo de solo 1: Organossolo Háplico sáprico típico - Jaguaruna (OXs), Gleissolo Háplico tb distrófico típico - Itajaí (GXbd-I) e Cambissolo Háplico tb distrófico típico - Pouso Redondo (CXbd-P); e Grupo de solo 2: Gleissolo Háplico tb distrófico típico-Gaspar (GXbd-G) e Cambissolo Háplico tb distrófico típico-Itajaí (CXbd-I). ⁽²⁾ n = 12. ⁽³⁾ n = 8. * e **: significativos a 5 e 1 %, respectivamente.

CONCLUSÕES

A quantidade de P absorvida pelas plantas de arroz aumentou linearmente com a elevação da dose aplicada de P e variou amplamente com os tipos de solo, independentemente da dose, evidenciando alta diferença no potencial produtivo entre esses.

O método EDTA seguido do de Olsen apresentaram maior taxa de recuperação de P dos solos, enquanto a Resina apresentou menor taxa. O Mehlich-1 e Mehlich-3 recuperaram valores intermediários.

O EDTA e Mehlich-3 foram os mais satisfatórios na predição da disponibilidade de P para as plantas de arroz, considerando os cinco solos estudados, diferentemente dos demais (Olsen, Mehlich-1 e Resina trocadora de ânions), que apresentaram baixa eficiência. Quando os solos foram separados em dois grupos, de acordo com características relacionadas à adsorção de P, todos os métodos foram eficientes em avaliar a disponibilidade de P para o arroz irrigado.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, pela concessão da bolsa de Pós-Doutorado Sênior ao primeiro autor, e pelas bolsas de produtividade em pesquisa do segundo e quinto autores. Ao pesquisador Ronaldir Knoblauch da EPAGRI, pela coleta das amostras de solo.

REFERÊNCIAS

- Alvarez V VH, Novais RF, Dias LE, Oliveira JA. Determinação e uso do fósforo remanescente. *B. Inf SBCS*. 2000;25:27-32.
- Bortolon L, Bortolon ESO, Gonçalves GK, Sousa RO, Schlindwein JA. Eficiência do fosfato natural para o arroz irrigado em solo do sul do Brasil. *J Biotecnol Biodivers*. 2014;5:43-9.
- Bortolon L, Gianello C, Schlindwein JA. Avaliação da disponibilidade de fósforo no solo para o milho pelos métodos Mehlich-1 e Mehlich-3. *Sci Agric*. 2009;10:305-12.
- Bortolon L, Gianello C. Interpretação de resultados analíticos de fósforo pelos extratores Mehlich-1 e Mehlich-3 em solos do Rio Grande do Sul. *R Bras Ci Solo*. 2008;32:2751-6.
- Comissão de Química e Fertilidade do Solo - CQFSRS/SC. Manual de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Passo Fundo: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo/Núcleo Regional Sul; 2004.
- Companhia Nacional de Abastecimento - Conab. Acompanhamento da safra brasileira: grãos. 11º levantamento 2013/2014 - ago./2014. Brasília: 2014. [Acesso em 12 set 2014]. Disponível em: http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/14_08_07_08_59_54_boletim_graos_agosto_2014.pdf.
- Costa JPV, Barros NF, Albuquerque AW, Moura Filho G, Santos JR. Fluxo difusivo de fósforo em função de doses e da umidade do solo. *R Bras Eng Agríc Amb*. 2006;10:828-35.
- Dick WA, Tabatabai MA. Determination of orthophosphate in aqueous solutions containing labile organic and inorganic phosphorus compounds. *J Environ Qual*. 1977;6:82-5.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solos. Rio de Janeiro: 1997.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa. Solos cultivados com arroz irrigado na região subtropical do RS e SC. [Acesso em 15 out 2013]. Disponível em: <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/#arroz>.
- Fageria NK, Carvalho GD, Santos AB, Ferreira EPB, Knupp AM. Chemistry of lowland rice soils and nutrient availability. *Commun Soil Sci Plant Anal*. 2011;42:1913-33.
- Fidelis RR, Pinto LC, Santos MM, Faccirolli AM, Brandão DR, Scheidt G. Efeito do fósforo em genótipos de arroz em solos de Cerrado. *Científica*. 2013;41:46-51.
- Gatiboni LC. Disponibilidade de formas de fósforo do solo às plantas [tese]. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria; 2003.
- Gonçalves GK, Bortolon L, Meurer EJ, Gonçalves DRN, Sousa RO, Fagundes SM. Extratores de fósforo para o arroz irrigado em solos adubados com fosfato natural reativo. *R Ci Agrovet*. 2012;11:196-204.
- Gonçalves GK, Meurer EJ. Alterações nas concentrações de fósforo em solos cultivados com arroz irrigado no Rio Grande do Sul. *R Bras Ci Solo*. 2010;34:465-71.
- Gonçalves GK, Meurer EJ. Disponibilidade de fósforo em solos cultivados com arroz irrigado por alagamento no Rio Grande do Sul. *R Bras Ci Solo*. 2008;32:745-50.
- Havlin JL, Beaton JD, Tisdale SL, Nelson WL. Soil Fertility and fertilizers: an introduction to nutrient management. 7th.ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson/Prentice Hall; 2005.

- Hernández J, Berger A, Deambrosi E, Lavecchia A. Phosphorus soil tests for flooded rice grown in contrasting soils and cropping. *Commun Soil Sci Plant Anal*. 2013;44:1193-210.
- Instituto Rio Grandense do Arroz - IRGA. Custo de produção do arroz irrigado médio ponderado no Rio Grande do Sul: sistema de cultivo mínimo (semi-direto) - estimativa da safra 2013/14. Porto Alegre; 2013. [Acesso em 15 ago 2014]. Disponível em: http://www.irga.rs.gov.br/upload/20140318133121custo_de_producao_medio_ponderado_arroz_irrigado_2013_14.pdf.
- Labhsetwar VK, Soltanpour PNA. Comparison of NH_4HCO_3 -DTPA, NaHCO_3 , CaCl_2 and Na_2 -EDTA soil tests for phosphorus. *Soil Sci Soc Am J*. 1985;49:1437-40.
- Lan ZM, Lin XJ, Wang F, Zhang H, Chen CR. Phosphorus availability and rice grain yield in a paddy soil in response to long-term fertilization. *Biol Fertil Soils*. 2012;48:579-88.
- Marchezan E, Camargo ER, Segabinazzi T. Manejo dos fertilizantes fosfatados e potássicos em arroz irrigado no sistema pré-germinado. *Bragantia*. 2007;66:219-26.
- Mehlich A. Determination of P, Ca, Mg, K, Na and NH_4 by North Carolina Soil Testing Laboratories. Raleigh: University of North Carolina; 1953. Não Publicado.
- Mehlich A. Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. *Commun Soil Sci Plant Anal*. 1984;15:1409-16.
- Moreira LFLM, Mota FOB, Clemente CA, Azevedo BM, Bomfim GV. Adsorção de fósforo em solos do Estado do Ceará. *R Ci Agron*. 2006;37:7-12.
- Munch JC, Ottow JCG. Preferential reduction of amorphous to crystalline iron oxides by bacterial activity. *Soil Sci*. 1980;129:15-21.
- Murphy J, Riley JPA. Modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal Chem Acta*. 1962;27:31-6.
- Novais RF, Smyth TJ. Fósforo em solo e planta em condições tropicais. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa; 1999.
- Olsen SR, Cold CV, Watanabe FS, Dean LA. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. Washington: U.S. Department of Agriculture; 1954. (Circular, 939).
- Peng JF, Wang BZ, Song YH, Yuan P, Liu Z. Adsorption and release of phosphorus in the surface sediment of wastewater stabilization pond. *Ecol Eng*. 2007;31:92-7.
- Ranno SK, Silva LS, Mallmann FJK. Fracionamento do fósforo inorgânico em solos de várzea do Rio Grande do Sul. *R Bras Ci Solo*. 2007;13:47-54.
- SAS Institute. SAS/STAT User's guide for personal computer. Release 9.12 SAS Institute. Cary, NC, USA: 2005.
- Schlindwein JA, Gianello C. Fosforo disponível determinado por lamina de resina enterrada. *R Bras Ci Solo*. 2009;33:77-84.
- Schwertmann U. Differenzierung der Eisenoxide des Bodens durch Extraction mit Ammoniuoxalat-losung. *Pflanzenernähr Bod*. 1964;105:194-202.
- Silva LS, Ranno SK, Rhoden AC, Santos DR, Graupe FA. Avaliação de métodos para estimativa da disponibilidade de fósforo para arroz em solos de várzea do Rio Grande do Sul. *R Bras Ci Solo*. 2008;32:207-16.
- Souza Júnior RF, Oliveira FHT, Santos HC, Freire FJ, Arruda JA. Frações de fósforo inorgânico do solo e suas correlações com o fósforo quantificado por extratores e pelo milho. *R Bras Ci Solo*. 2012;36:159-69.
- Sposito G. The chemistry of soils. New York: Oxford University Press; 1989.
- Tedesco MJ, Gianello C, Bissani CA, Bohnen H, Volkweiss SJ. Análise de solo, plantas e outros materiais. 2ª.ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 1995. (Boletim técnico, 5).
- Wiatrak P. Influence of phosphorus application with avail on following soybeans in Southeastern Coastal Plains. *Am J Agric Biol Sci*. 2013;8:287-92.
- Yang W, Cheng H, Lin C, Ouyang W. Phosphorus distribution in Chinese albic black soil affected by land use. *Afr J Agric Res*. 2012;7:810-18.
- Zhang Q, Wang GH, Feng YK, Sun QZ, Wit C, Dobermann A. Changes in soil phosphorus fractions in a calcareous paddy soil under intensive rice cropping. *Plant Soil*. 2006;288:141-54.