

FÁBIO BROGGI

**ADSORÇÃO E DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO EM SOLOS COM
DIFERENTES COMPOSIÇÕES MINERALÓGICAS**

RECIFE-PE

2004

FÁBIO BROGGI

**ADSORÇÃO E DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO EM SOLOS COM DIFERENTES
COMPOSIÇÕES MINERALÓGICAS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

RECIFE
PERNAMBUCO – BRASIL
2004

FÁBIO BROGGI

**ADSORÇÃO E DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO EM SOLOS COM DIFERENTES
COMPOSIÇÕES MINERALÓGICAS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador

Prof. Fernando José Freire, Dr.

Conselheiros

Prof. Clístenes Williams Araújo do Nascimento, Dr.

Prof. Maria Betânia Galvão dos Santos Freire, Dr^a.

RECIFE
PERNAMBUCO – BRASIL
2004

**ADSORÇÃO E DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO EM SOLOS COM DIFERENTES
COMPOSIÇÕES MINERALÓGICAS**

FÁBIO BROGGI

Dissertação defendida e aprovada em 26 de março de 2004 pela banca examinadora:

Orientador: _____

Prof. Fernando José Freire, Dr.

DEPA/UFRPE

Examinadores: _____

Prof. Clístenes Williams Araújo do Nascimento, Dr.

DEPA/UFRPE

Prof. Gilson Moura Filho, Dr.

UFAL

Prof^a Maria de Fátima Cavalcante Barros, Dra.

DEPA/UFRPE

Ficha catalográfica

Setor de Processos Técnicos da Biblioteca Central – UFRPE

B866a Broggi, Fábio

Adsorção e disponibilidade de fósforo em solos com diferentes composições mineralógicas/Fábio Broggi. 2004 54f.:il.

Orientador: Fernando José Freire

Dissertação: (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal Rural de Pernambuco. Departamento de Agronomia
Bibliografia.

CDD 63141

1. Fósforo lábil
 2. Extratores de fósforo
 3. Capacidade Máxima de Adsorção de Fósforo (CMAP)
- I. Freire, Fernando José
 - II. Título

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela saúde do corpo e mente;

A minha esposa Viviane, pelo amor e carinho;

Aos meus avós, pais, irmãos, sogros, que mesmo à distância sempre acreditaram em meu trabalho e estudo;

Ao professor-orientador Fernando José Freire e aos professores-conselheiros Clístenes Williams Araújo do Nascimento e Maria Betânia Galvão dos Santos Freire, pela orientação, paciência e estímulo ao gosto pela ciência;

Aos professores Mateus Rosas Ribeiro e Paulo Klinger Tito Jacomine, pela orientação na escolha dos solos a serem pesquisados;

À Maria da Graça Xavier Ferreira e Hugo Villaroel, respectivamente professores da Universidade Católica de Pernambuco e Universidade Federal de Pernambuco, pelas sugestões e auxílio na interpretação dos difratogramas mineralógicos;

Aos professores Gilson Moura Filho e Maria de Fátima Cavalcante Barros, pelas sugestões finais ao trabalho;

Aos servidores públicos ligados ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da UFRPE, em especial a Socorro, Luciano e Noca;

Ao servidor público e agrônomo José Fernando Wanderley Fernandes Lima (Zeca), pelo companheirismo, conhecimento e apoio nas coletas de amostras de solos;

Aos amigos do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo.

SUMÁRIO

	Página
INTRODUÇÃO GERAL.....	1
ADSORÇÃO DE FOSFATO EM SOLOS COM DIFERENTES COMPOSIÇÕES MINERALÓGICAS.....	2
1 INTRODUÇÃO.....	4
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	5
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	10
3.1 Estimativa do fator capacidade de fósforo (FCP) e sua relação com características físicas e químicas dos solos.....	10
3.2 Efeito do pH dos solos na capacidade máxima de adsorção (CMAP) e energia de adsorção (EA).....	12
3.3 Efeito do tempo de incubação sobre a recuperação de P dos solos pelos extratores Mehlich-1, Mehlich-3, Bray-1 e CaCl_2 $0,01 \text{ mol L}^{-1}$.....	13
4 CONCLUSÕES.....	23
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	23
NÍVEIS CRÍTICOS DE FÓSFORO EM SOLO E PLANTA E SUAS RELAÇÕES COM A ADSORÇÃO DE FOSFATO.....	27
5 INTRODUÇÃO.....	29
6 MATERIAL E MÉTODOS.....	30
7 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	34
7.1 P disponível pelos extratores Mehlich-1, Mehlich-3, Bray-1 e CaCl_2 $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ em função do tempo de incubação.....	34
7.2 Matéria seca da parte aérea de milho e doses estimadas de P para 90 % da produção máxima.....	36
7.3 Níveis críticos de P nos solos.....	41
7.4 Níveis críticos de P nas plantas.....	43
CONCLUSÕES.....	49
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	50

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	53
--	-----------

INTRODUÇÃO GERAL

A agricultura nacional tem dado provas de sua importância como atividade econômica, geradora de renda, de empregos, de novos conhecimentos e novas tecnologias. Setor que envolve atividades da indústria, comércio, prestação de serviços, de pesquisa nas universidades; faz com a terra atenda a sua função social.

Dentro deste processo, os solos são o recurso natural que mais poderá influenciar no resultado final da atividade. O conhecimento e a interpretação de suas características e propriedades, juntamente com a utilização de práticas de manejo adequadas, poderão manter e, ou, aumentar sua fertilidade, potencializando seu uso.

Dentre estas características, destacam-se os constituintes minerais da fração argila, responsáveis por importantes propriedades físicas e químicas. Nos solos tropicais, intemperizados pela ação dos fatores de formação como clima, e a atividade de organismos, há o predomínio de argilominerais 1:1 (caulinita e de óxidos), destacando-se os de Fe (hematita e goethita) e Al (gibbsita). São solos profundos, bem drenados e estruturados, geralmente sem restrições físicas, mas com baixa CTC, baixa V%, alta m% e apresentam baixa disponibilidade natural para o nutriente fósforo (P).

A manutenção de teores de P nos solos intemperizados, adequados ao desenvolvimento das espécies cultivadas economicamente, poderá ser dentre os elementos essenciais, o que mais poderá contribuir para o aumento dos custos de produção. O grande poder de adsorção destes solos faz com que uma maior quantidade do nutriente seja aplicada por unidade de matéria seca produzida, passando o solo a estabelecer uma forte concorrência com a planta pelo P disponível em solução.

Neste ambiente, a localização do fertilizante granulados nos sulcos de plantio e a compreensão da demanda do nutriente pela planta durante seu ciclo produtivo poderão ser saídas para o enorme dreno que são estes solos, caso contrário, a atividade agrícola poderá ser economicamente inviável.

CAPÍTULO 1

ADSORÇÃO DE FOSFATO EM SOLOS COM DIFERENTES COMPOSIÇÕES MINERALÓGICAS

RESUMO

Amostras subsuperficiais de cinco solos receberam doses de P aplicadas a partir de fontes solúveis, em função de suas capacidades máximas de adsorção de fósforo (CMAP), correspondentes aos níveis: 0; 0,2; 0,4; 0,8; 1,0. As amostras foram incubadas por 90, 60, 30, 15 e 0,5 dia. Os períodos de incubação foram iniciados em diferentes épocas de modo a se ter, num mesmo e último dia, os diferentes períodos de equilíbrio solo-P satisfeitos, quando retirou -se amostras para a determinação do P recuperado pelos extratores Mehlich-1, Mehlich-3, Bray-1 e CaCl_2 . 0,01 mol L^{-1} . O experimento consistiu de um fatorial 5 x 5 x 5 (cinco solos, cinco doses e cinco tempos de incubação), distribuídos em blocos ao acaso, com três repetições. As características dos solos que melhor refletiram o fator capacidade de P (FCP) e a taxa de recuperação do P aplicado foram o P remanescente (P rem) e a CMAP. Os solos com maior CMAP, FCP e menor P rem, apresentaram um aumento crescente de P residual em um menor espaço de tempo . A concentração de 60 mg L^{-1} de P, empregada na caracterização do P rem, parece insuficiente para uma adequada caracterização de solos altamente intemperizados no que diz respeito ao seu potencial de adsorção.

Palavras chave: fósforo lábil, extratores de fósforo, capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP).

ABSTRACT

PHOSPHATE ADSORPTION IN SOILS WITH DIFFERENT MINERALOGICAL COMPOSITION

In order to study the influence of soil mineralogy on phosphate adsorption, samples from subsurface of five soils received doses of soluble sources of phosphorus. Such doses were defined recording to maximum phosphate adsorption capacity (MPAC) and corresponded to 0; 0.2; 0.4; 0.8 and 1.0 levels. After addition, soils samples were incubated for different periods (90, 60, 30, 15 and 0,5 day) aiming to reach the P adsorption equilibrium at the same day. Mehlich-1, Mehlich-3, Bray-1 and CaCl_2 $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ extractants were used to recover P from incubated soil samples. A block design experiment, factorial scheme, was utilized (2 soils, 5 doses and 5 periods of incubation). The soil characteristics that best estimated both the phosphorus capacity (PC) and the recovery of applied phosphorus were remaining P (rem-P) and MPAC. Soils with highest MPAC and PC, and lowest rem-P, presented higher reversibility of non-labile P (residual P) in lesser period of incubation. The 60 mg L^{-1} P concentration, employed in the rem-P characterization, does not seem adequate for proper P adsorption characterization of highly weathering soils.

Key words: labile phosphorus, phosphorus extractants, maximum phosphate adsorption capacity (MPAC).

1 INTRODUÇÃO

Os minerais coloidais encontrados na fração argila são responsáveis por importantes reações físicas e químicas dos solos. O processo de adsorção de íons da solução do solo é um exemplo deste tipo de fenômeno. Neste contexto, o P tem sido objeto de um grande número de trabalhos, por ser o nutriente que mais onera os custos de produção agrícola, pela baixa relação matéria-seca produzida/kg de nutriente aplicado. Isto se deve tanto a sua deficiência natural, principalmente em solos tropicais (RAIJ, 1991), quanto a sua indisponibilidade em solos argilosos e intemperizados (GONÇALVES et. al., 1989).

O fator capacidade de fósforo (FCP) ou poder tampão de fosfato, é definido pela razão de equilíbrio entre a quantidade de P (Q) e o P em solução (I) e representa uma medida da capacidade do solo em manter um nível determinado de P em solução. As características e o teor dos constituintes minerais da fração argila são responsáveis pela velocidade do processo de passagem do P lábil para o P não-lábil (NOVAIS & SMITH, 1999).

Fox & Searle (1978) indicam que o processo de adsorção pode seguir uma ordem preferencial de predomínio dos seguintes minerais: argilas 2:1 < argilas 1:1 < óxidos cristalinos de Fe e Al < óxidos amorfos de Fe e Al. A adsorção de fosfato é influenciada pelos minerais encontrados nos solos, que apresentam grupamentos superficiais Fe-OH e Al-OH, aos quais poderá ser adsorvido por meio de troca de ligantes (quimiossorção) com o estabelecimento de ligações covalentes, além disso, a forma da estrutural mineral e sua superfície específica potencializam o efeito da adsorção (MESQUITA FILHO & TORRENT, 1993).

Não apenas nas áreas do Brasil Central recobertas pela vegetação de cerrado, como também na faixa litorânea, encontram-se solos predominantemente óxidicos (hematita-Fe₂O₃, goethita-FeOOH- e gibbsita-Al(OH)₃) e, ou, caulíníticos. Argilas 2:1 encontram-se em solos sob uma menor ação do intemperismo, como no clima semi-árido do Nordeste brasileiro, sendo geralmente aproveitados para irrigação. Nestes distintos ambientes pedológicos, além da adsorção, o processo de precipitação também poderá contribuir para a indisponibilidade de P às plantas, em que íons fosfato formarão compostos de menor solubilidade com Al ou Fe em solos ácidos ou com Ca em solos neutros ou alcalinos (HSU, 1965).

Este trabalho objetivou avaliar a adsorção de fosfato em solos com diferentes constituições mineralógicas da fração argila; avaliar a taxa de recuperação do P aplicado pelos extratores Mehlich-1, Mehlich-3, Bray-1 e CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ em função do tempo de incubação

do fósforo; bem como correlacionar características físicas e químicas dos solos com o poder tampão de fosfato.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Foram selecionados cinco solos, procedentes dos estados de Pernambuco e Mato Grosso, tomando-se como referência, tanto o teor, como a constituição mineralógica da fração argila (Figura 1).

As amostras de solos foram coletadas em subsuperfície (Quadro 1), secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira com malha de 2 mm, tanto para a instalação do experimento, como para as análises físicas e químicas, que foram realizadas conforme EMBRAPA (1997) (Quadro 2). O P remanescente (P rem) foi determinado de acordo com Alvarez. et. al. (2000).

Para avaliar a capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP), amostras de 2,5 cm³ de Terra Fina Seca ao Ar (TFSA) de cada solo receberam 11 doses de P (KH₂PO₄ p.a.), situadas no intervalo de 0 a 110 mg L⁻¹ para o LAd₁; 0 a 260 mg L⁻¹ para o LAd₂, LVAd, e NVdf e de 0 a 80 mg L⁻¹ para o VEO (ALVAREZ V. et al., 2000).

As doses foram aplicadas utilizando-se 25 mL de uma solução de equilíbrio (CaCl₂ 2H₂O 0,01 mol L⁻¹, contendo as diferentes doses de P), agitou-se em enlenmeyer de 125 mL por 24 horas, centrifugou-se por 5 minutos e filtrou-se, determinando-se a concentração de P no sobrenadante por colorimetria (BRAGA & DEFELIPO, 1974). Utilizou-se a isoterma de Langmuir linearizada ($C/q = 1/ab + 1/bC$) para determinar a CMAP (b), expressa em mg cm⁻³; e a constante (a), relacionada com a energia de adsorção (EA), expressa em L mg⁻¹.

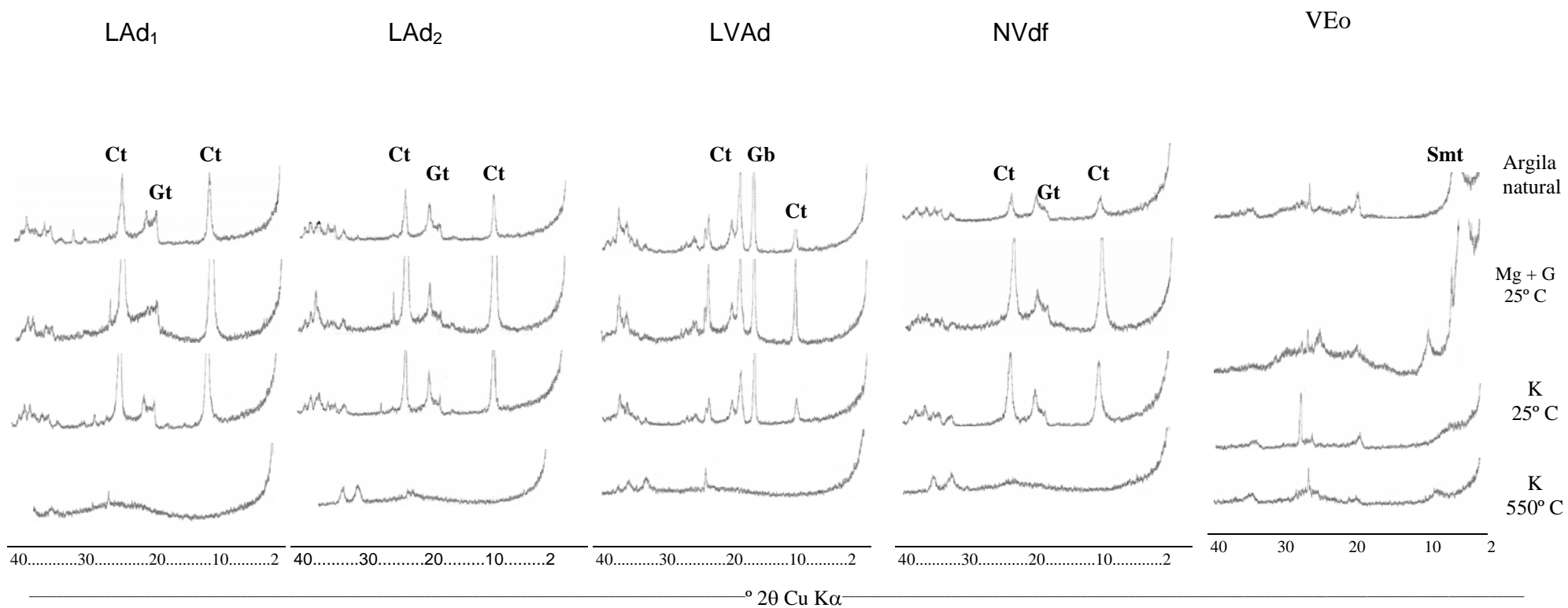


Figura 1. Difratomogramas de raios-X da fração argila, referentes aos horizontes dos perfis dos solos estudados. Minerais identificados: esmectita (Smt), caulinita (Ct), goethita (Gt) e gibbsita (Gb).

Quadro 1. Identificação, classe, horizonte, profundidade e procedência das amostras dos solos estudados

Identificação/Classe	Horizonte	Profundidade	Procedência
LAd ₁ - Latossolo Amarelo distrófico	Bw ₃	132-155+ cm	Igarassú-PE
LAd ₂ - Latossolo Amarelo distrófico	Bw ₁	74-155 cm	Ipojuca-PE
LVAd-Latossolo Vermelho Amarelo distrófico	Bw ₁	95-165 cm	Jaciara-MT
NVdf- Nitossolo Vermelho distroférico	B _{nítico}	30-56 cm	Cabo-PE
VEo- Vertissolo Ebânico órtico	Cv	5-25 cm	Cachoeirinha-PE

Quadro 2. Caracterização física e química dos solos estudados

Característica	Solo				
	LAd ₁	LAd ₂	LVAd	NVdf	VEo
Areia (dag kg ⁻¹)	76,8	24,2	49,8	11,8	29,8
Silte (dag kg ⁻¹)	4,0	3,2	8,0	17,5	15,5
Argila (dag kg ⁻¹)	19,2	72,6	42,2	70,7	54,7
Ds (Mg.m ⁻³) ⁽¹⁾	1,57	1,22	1,53	1,12	1,72
Dp (Mg.m ⁻³) ⁽²⁾	2,63	2,77	2,63	2,89	2,56
Cond. hidráulica (cm.h ⁻¹)	10,18	6,04	3,62	5,81	0,38
Cc (%) ⁽³⁾	7,94	29,51	22,37	39,7	39,53
PMP (%) ⁽⁴⁾	4,67	21,95	15,97	29,6	27,48
pH H ₂ O (1:2,5)	4,5	4,7	4,8	4,4	6,8
pH KCl	3,9	4,5	5,9	4,1	5,2
P Mehlich-1 (mg.dm ⁻³)	0,35	0,0	0,0	2,36	495,6
P Mehlich-3 (mg.dm ⁻³)	2,63	2,1	1,7	3,5	26,0
P Bray-1 (mg.dm ⁻³)	0,73	0,15	0,12	0,4	15,4
P CaCl ₂ (mg.dm ⁻³)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4
Na (cmolc.dm ⁻³)	0,03	0,07	0,03	0,03	1,39
K (cmolc.dm ⁻³)	0,02	0,01	0,05	0,02	0,3
Ca+Mg (cmolc.dm ⁻³)	0,3	0,2	0,15	1,2	72,7
Al (cmolc.dm ⁻³)	1,0	0,15	0,0	0,45	0,0
H+Al (cmolc.dm ⁻³)	3,71	3,3	1,89	5,85	1,48
CTC pH 7,0 (cmolc.dm ⁻³)	4,06	3,58	2,12	7,1	75,6
m (%)	74,0	35,0	0,0	26,0	0,0
C org. (g kg ⁻¹)	0,8	0,43	0,44	0,76	5,8
P-rem (mg.L ⁻¹) ⁽⁵⁾	22,53	0,49	0,097	0,37	37,32
CMAP (mg.cm ⁻³) ⁽⁶⁾	0,54	2,13	2,76	2,44	0,31
EA (mg L ⁻¹) ⁻¹⁽⁷⁾	0,92	0,71	4,75	1,11	0,35
FCP (10 ⁻⁸ mol/cm ³ /upF) ⁽⁸⁾	65,0	400,0	286,0	333,0	69,0
Fe _{ox} (dag kg ⁻¹) ⁽⁹⁾	0,28	0,33	0,14	0,38	0,17
Fe _d (dag kg ⁻¹) ⁽¹⁰⁾	3,55	4,42	2,7	5,83	0,25
Fe _{ox} / Fe _d	0,08	0,075	0,05	0,06	0,67

⁽¹⁾ Ds: densidade do solo; ⁽²⁾ Dp : densidade de partículas; ⁽³⁾ Cc : capacidade de campo; ⁽⁴⁾ PMP : ponto de murcha permanente; ⁽⁵⁾ P-rem : fósforo remanescente; ⁽⁷⁾ EA : energia de adsorção; ⁽⁸⁾ FCP : fator capacidade de fósforo; ⁽⁹⁾ Fe_{ox}: ferro oxalato; ⁽¹⁰⁾ Fe_d: ferro ditionito

Para estimar o FCP das amostras de solo foram determinados inicialmente, o fator intensidade (I) e o fator quantidade (Q). Foram utilizados 5 cm³ de TFSA de cada solo, que receberam oito doses de P, definidas de acordo com os valores de P rem de cada amostra, nos intervalos de 0 a 12 mg L⁻¹ para o VEO, de 0 a 32 mg L⁻¹ para o LAd₁, de 0 a 160 mg L⁻¹ para o LAd₂, LVAd e NVdf (modificado de ALVAREZ V. et. al., 2000); aplicadas através de 50 mL de uma solução de equilíbrio (CaCl₂ 2H₂O 0,01 mol L⁻¹). Agitou-se em enlenmeyer de 125 mL por 1 h, centrifugou-se por 5 minutos e filtrou-se, sendo a concentração de P do sobrenadante determinada por colorimetria (BRAGA & DEFELIPO, 1974) e transformada em potencial (I), expresso em upF (unidade potencial de fosfato).

O fator Q foi calculado pela quantidade de P adsorvida, resultado da subtração entre o P adicionado (doses) e o que permaneceu na solução de equilíbrio. O FCP foi determinado estimando-se uma equação de regressão dos valores de I em função de Q.

Realizou-se a separação da fração argila das amostras dos solos. Para preparação das lâminas para análise mineralógica por difratometria de raios-X, (JACKSON, 1969). As leituras das amostras foram realizadas em difratômetro equipado com tubo de cobre, utilizando-se radiação CuK α operado a 20 mA e 40 kV.

Utilizou-se o método proposto por Coffin (1963) e Schwertmann (1964), para a avaliação do grau de cristalinidade dos óxidos de ferro presentes na fração argila, sendo os teores de Fe amorfo (Fe_{oxalato}) e Fe cristalino (Fe_{ditionito}) determinados por espectrofotometria de absorção atômica.

Para correção da acidez, a exceção do VEO (pH 7,0), os solos foram incubados com uma mistura de CaCO₃ e MgCO₃, numa relação molar de 4:1 por um período de 60 dias e a quantidade de corretivo estimada pela acidez potencial (H+Al) dos solos (FREIRE, 2001). Nas amostras de solos corrigidos também determinou-se a CMAP e energia de adsorção.

As parcelas consistiram de amostras de solos de 2 kg acondicionadas em sacos plásticos, que receberam doses de P aplicadas por meio de soluções de KH₂PO₄, NH₄H₂PO₄ e NaH₂PO₄, correspondentes aos seguintes níveis da CMAP de cada solo: 0; 0,2; 0,4; 0,8; 1,0 (Quadro 3).

As amostras de solos foram incubadas por 0,5, 15, 30, 60, 90 dias, e esses períodos de incubação foram iniciados em diferentes épocas de modo a se ter, em um mesmo e

último dia os diferentes períodos de equilíbrio solo-P satisfeitos. Durante o experimento, a umidade foi mantida a 80 % da capacidade de campo.

No último dia de incubação, foram retiradas amostras de solo de cada saco plástico, de modo a obter-se 100 g de solo seco. A secagem foi realizada à 60° C em copos plásticos por 48 horas. Para cada tratamento, determinou-se o P recuperado pelos extratores Mehlich-1 (HCl 0,05 mol L⁻¹ + H₂SO₄ 0,0125 mol L⁻¹), 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), Bray-1 (HCl 0,025 mol L⁻¹ + NH₄F 0,03 mol L⁻¹) e CaCl₂ 2H₂O (0,01 mol L⁻¹), numa relação solo:extrator de 1:10 (4 cm³ de TFSA e 40 mL da solução extratora). A avaliação de P no extrato foi realizada por colorimetria, de acordo com Braga & Defelipo (1974).

Quadro 3. Capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP), intervalo experimental e doses de fósforo aplicadas aos solos

Solo	CMAP ⁽¹⁾ mg cm ⁻³	Intervalo experimental		Doses de P
		mg dm ⁻³		
LAd ₁	0,5397	0 - 540		0; 108; 216; 432; 540
LAd ₂	2,1344	0 - 2134		0; 427; 854; 1707; 2134
LVAd	2,7570	0 - 2757		0; 551; 1103; 2206; 2757
NVdf	2,4372	0 - 2437		0; 487; 975; 1950; 2437
VEo	0,3084	0 - 308		0; 62; 123; 247; 308

⁽¹⁾CMAP= capacidade máxima de adsorção de fósforo

Os dados de CMAP e EA em solos corrigidos e não corrigidos foram submetidos à análise de variância pelo teste F, e as médias foram comparadas pelo teste de Scott-Knott (p<5 %). Realizou-se correlações entre o FCP e taxa de recuperação do P aplicado com características físicas e químicas dos solos, bem como análises de regressão entre P recuperado e taxa de recuperação do P aplicado em função de doses e tempos de incubação.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Estimativa do fator capacidade de fósforo (FCP) e sua relação com características físicas e químicas dos solos

Os valores do fator intensidade (I), em unidade de potencial de fosfato dos solos LAd₁, LAd₂, LVAd, NVdf, VEo, foram maiores que 7,0 (Quadro 4), ou seja, compatíveis com a baixa disponibilidade natural de P dos solos (NOVAIS & SMYTH, 1999; Silva et al., 2004); caracterizando uma baixa atividade de P em solução.

Esta baixa atividade de P em solução é compatível com os elevados valores de FCP do LAd₂, LVAd e NVdf (Quadro 2). No entanto, o valor do FCP do solo LAd₁ (Quadro 2) é pequeno para a baixa atividade de P em solução (elevado I), porém, provavelmente, é compatível com o baixo fator quantidade (Q) deste solo, caracterizado pelo baixo teor de argila e elevado valor de P rem (Quadro 2).

O VEo apresenta a maior atividade de P em solução, compatível com seu baixo FCP (Quadro 2). O teor de argila deste solo (Quadro 2) mostra que há potencial para elevado fator Q, no entanto, isto não ocorre, pelo baixo FCP e alto P rem. A mineralogia da fração argila no VEo apresenta predominância de argilo minerais 2:1 (Figura 1), o que lhe confere uma certa semelhança com solos arenosos, quando ao fenômeno de adsorção de P, explicando a elevada atividade de P em solução.

Quadro 4. Fator intensidade, em potencial de fosfato (0,5 pCa + pH₂PO₄), das amostras de solos estudadas

Solo	Fator intensidade (I)
	(upF)
LAd ₁	10,91
LAd ₂	9,82
LVAd	12,90
NVdf	10,87
VEo	7,60

Para enfatizar esta justificativa, LAd₁ e VEo apresentaram valores de P rem, FCP e CMAP muito próximos, enquanto o teor de argila do VEo é aproximadamente três vezes superior ao do LAd₁(Quadro 2), indicando que a maior concentração de argila do VEo não

está, de forma proporcional, influenciando no seu FCP quando comparado ao LAd₁. Fica evidente que não somente a quantidade, mas também a qualidade dos constituintes minerais da fração argila do solo (BAHIA FILHO et al.,1983) interferem no “status” de P dos solos, indicado por seus valores de FCP.

As características dos solos que melhor refletiram o FCP foram o P rem, CMAP e teor de argila(Quadro 5). Assim, como Silva et al.(2004), sugere-se a determinação do P rem por melhor estimar o FCP dos solos e por ser de fácil determinação em laboratório de rotina.

Entendendo que o P rem é uma medida da CMAP de um único ponto (60 mg L⁻¹ de P), em solos muito argilosos como o LAd₂ e NVdf (Quadro 2), com predominância, respectivamente, de goethita e hematita na fração argila (Figura 1), essa concentração de P parece não ser a concentração adequada para esta análise. Do mesmo modo, solo com predominância de gibbsita na fração argila (Figura 1) como o LVAd (Quadro 2), esta mesma concentração na análise parece, também inadequada pela elevada CMAP deste solo.

Quadro 5. Coeficientes de correlação linear simples entre valores do fator capacidade de fósforo (FCP) e características físicas e químicas dos solos

Característica	FCP
Argila (dag kg ⁻¹)	0,721 [⊗]
P rem (mg L ⁻¹) ⁽¹⁾	- 0,914 [*]
CMAP (mg cm ⁻³) ⁽²⁾	0,893 [*]
EA (mg L ⁻¹) ⁻¹⁽³⁾	0,258 ^{n.s}
Fe _{ox} ⁽⁴⁾	0,452 ^{n.s}
Fe _d ⁽⁵⁾	0,672 ^{n.s}
Fe _{ox} /Fe _d	- 0,60 ^{n.s}

*; ⊗; n.s; significativo a 5%, 10% e não significativo, respectivamente.

⁽¹⁾ fósforo remanescente; ⁽²⁾ capacidade máxima de adsorção de fósforo; ⁽³⁾ energia de adsorção; ⁽⁴⁾ ferro oxalato; ⁽⁵⁾ ferro ditionito.

3.2 Efeito do pH na capacidade máxima de adsorção (CMAP) e na energia de adsorção (EA)

O pH final dos solos incubados situou-se entre 6,5 e 7,2. Embora pequena, houve pequena mas significativa alteração da CMAP dos solos LAd₁ e LAd₂ (Quadro 6), ao contrário do observado por Vasconcellos et al. (1974).

O efeito da calagem sobre a CMAP é ainda muito discutido pelos pesquisadores (HAYNES, 1974; VASCONCELLOS et al, 1974; PARFITT, 1978; POSNER & BOWDEN, 1980; BARROW, 1985). Para alguns (PARFITT, 1978; HAYNES, 1984) adsorção de P pelo solo deve ser máxima para baixos valores de pH, enquanto para outros (VASCONCELLOS et al., 1974) há pequena, mas não consistente, alteração na CMAP em diferentes valores de pH.

Quadro 6. Capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP) e energia de adsorção (EA) dos solos submetidos a correção do pH e análise de variância dos efeitos estudados

Solo	CMAP		EA		Média
	Corrigido	Não corrigido	Corrigido	Não corrigido	
LAd ₁	0,62 aD	0,59 bD	0,59	0,80	0,69 D
LAd ₂	2,32 aC	2,21 bC	0,83	0,80	0,82 C
LVAd	2,85 aA	2,87 aA	4,53	4,81	4,67 A
NVdf	2,47 aB	2,48 aB	1,28	1,31	1,30 B
Média			1,81 b	1,93 a	
F					
Solo	32.620,60***		1.127,53***		
Correção	24,36***		4,86*		
Solo*Correção	26,73***		1,73 ^{ns}		
C.V.(%)	0,65		7,33		

Médias seguidas de mesma letra minúscula nas linhas e maiúscula nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott (p < 5%).

***, *, n.s ; significativo a 0,1 %, 5 % e não significativo, respectivamente.

A calagem de solos com elevada saturação de Al³⁺, como o LAd₁ e LAd₂ (Quadro 2), tende a aumentar a adsorção de P. Segundo Haynes (1974), polímeros de hidróxido de Al³⁺ recém-formados com a calagem apresentam alta afinidade pelo P. A diminuição na CMAP dos solos LVAd e NVdf não foi significativa devido a ausência de Al³⁺ no LVAd, e pelos elevados teores de Ca+Mg no NVdf (Quadro 2). Segundo Novais & Smyth (1999), o aumento da força iônica da solução de solos ácidos com a calagem e a grande presença de Ca, mascaram o efeito esperado de maior pH, decrescendo a adsorção de P dos solos.

Por outro lado, a energia de adsorção (EA) nos solos corrigidos foi, em média, significativamente menor, independentemente do solo (Quadro 6). Esta tendência de

diminuição da EA pode ser explicada pelo aumento da carga superficial negativa das partículas do solo com o aumento do pH, aumentando a repulsão de P e, conseqüentemente, reduzindo a EA destas partículas. Segundo alguns pesquisadores (POSNER & BOWDEN, 1980; HAYNES, 1974; BARROW, 1985, GONÇALVES et al., 1985) há uma diminuição no potencial eletrostático do plano de adsorção com o aumento do pH do solo.

3.3 Efeito do tempo de incubação sobre a recuperação de P dos solos pelos extratores Mehlich-1, Mehlich-3, Bray-1 e CaCl_2 0,01 mol L⁻¹

De maneira geral, os extratores Mehlich-1 e Bray-1 apresentaram maiores valores de P recuperado nas diferentes doses aplicadas e tempos de incubação (Quadro 7).

As variações no P recuperado decorreram das interações entre as soluções extratoras, com diferentes níveis de pH, fator de diluição, presença de ânions, e de diferenças na composição física e química dos solos.

Observou-se nos tratamentos onde não foi aplicado P, uma variação pequena e não sistemática do P recuperado nos diferentes tempos de incubação. A partir da segunda dose, houve uma tendência de queda de P recuperado com o tempo de incubação para todos os solos (Quadro 7).

No VEO, o extrator Mehlich-1 apresentou maiores valores de P recuperado, provavelmente, pela solubilização do P ligado a Ca (P-Ca), sugerindo que os extratores Mehlich-3 e Bray-1 sejam mais adequados aos solos encontrados em ambientes de menor intemperismo, como é o caso do VEO. Freire (2001) já alertava para a necessidade de pesquisas de métodos de extração do P pelos extratores Bray-1 e Mehlich-3 em solos do semi-árido do Nordeste do Brasil.

Quadro 7. Fósforo recuperado pelos extratores Mehlich-1, Mehlich-3, Bray-1 e CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ nos diferentes níveis de fósforo aplicados e tempos de incubação

Nível	Tempo (dia)	Mehlich-1					Mehlich-3					Bray-1					CaCl ₂ 0,01 mol L ⁻¹				
		LAd ₁	LAd ₂	LVA _d	NV _{df}	VE _o	LAd ₁	LAd ₂	LVA _d	NV _{df}	VE _o	LAd ₁	LAd ₂	LVA _d	NV _{df}	VE _o	LAd ₁	LAd ₂	LVA _d	NV _{df}	VE _o
		mg dm ⁻³																			
0	0,5	0,43	0,05	0,01	1,83	362,34	3,96	3,74	3,31	5,00	28,46	0,85	0,13	0,20	0,65	20,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	15	1,08	0,32	0,2	2,92	593,23	3,33	2,77	2,35	4,07	23,37	1,03	0,15	0,15	0,15	11,12	0,17	0,17	0,17	0,17	0,52
	30	0,00	0,00	0,00	2,73	545,44	3,37	2,83	2,52	4,94	29,50	0,71	0,13	0,13	0,45	16,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,52
	60	0,24	0,00	0,00	2,40	524,42	1,26	0,27	0,00	1,33	20,14	0,80	0,29	0,10	0,42	15,39	0,00	0,00	0,00	0,03	0,72
	90	0,00	0,00	0,00	1,94	452,90	1,26	0,86	0,27	2,03	28,48	0,28	0,03	0,03	0,34	14,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,47
0,2	0,5	66,94	86,67	13,69	93,97	384,30	55,42	45,97	14,04	48,88	67,47	91,36	110,34	27,42	114,30	70,77	0,86	0,05	0,00	0,21	2,98
	15	68,38	91,48	37,78	132,23	578,11	40,73	33,34	18,03	43,31	42,95	62,15	52,53	26,48	45,81	28,61	0,64	0,29	0,17	0,53	1,80
	30	61,26	137,04	13,90	56,93	464,74	50,80	57,41	13,65	26,14	52,86	67,36	97,42	16,90	34,39	50,77	0,24	0,29	0,00	0,00	1,91
	60	41,61	21,72	12,36	87,10	441,28	33,02	54,60	3,55	30,64	43,32	38,18	11,25	12,06	21,01	51,63	0,04	0,01	0,00	0,21	2,04
	90	41,97	26,12	10,53	19,58	368,31	41,14	20,74	10,51	7,43	53,60	39,77	22,65	13,14	3,67	44,75	0,00	0,00	0,00	0,15	2,16
0,4	0,5	138,63	92,00	117,65	224,30	412,67	160,45	115,77	41,75	174,03	84,66	220,80	144,64	111,28	327,98	100,58	5,93	0,66	0,64	9,00	6,24
	15	125,24	321,10	261,63	345,54	681,17	105,48	132,54	54,03	141,66	83,05	120,24	193,86	104,80	194,49	45,13	2,61	5,08	2,05	6,48	8,23
	30	167,15	364,32	73,72	212,56	480,96	146,01	180,27	32,93	96,66	88,46	171,37	329,31	54,34	176,71	94,16	3,73	9,94	0,00	1,61	6,26
	60	70,55	152,25	42,36	224,23	526,41	58,21	58,44	19,21	124,90	70,93	72,07	107,22	26,59	120,21	85,61	0,83	0,32	0,00	3,80	5,70
	90	101,65	108,47	34,19	76,01	409,64	106,12	64,58	32,35	35,23	79,40	104,08	84,82	25,30	44,28	73,30	1,09	0,00	0,00	0,20	5,30
0,8	0,5	263,20	676,78	1682,66	411,56	681,09	338,01	438,33	121,28	403,64	432,63	418,20	928,05	186,35	742,70	502,11	24,21	105,73	3,00	30,36	142,16
	15	336,07	688,66	877,53	1289,72	771,85	273,28	296,14	120,81	629,30	159,67	264,37	433,56	232,42	978,73	85,17	19,63	69,32	19,60	180,96	17,66
	30	317,44	1328,62	1116,25	708,55	723,80	277,25	567,26	151,25	399,80	273,21	349,21	1077,84	332,40	683,00	305,92	16,73	135,95	20,54	65,65	74,06
	60	193,77	589,41	156,37	796,03	566,63	194,13	324,50	65,88	458,48	121,88	279,18	545,66	70,37	860,80	150,40	9,89	29,76	0,49	87,50	18,47
	90	158,47	284,70	219,18	556,16	481,02	270,76	241,85	87,59	409,42	143,68	254,75	326,34	71,77	551,01	130,02	10,02	7,01	0,00	34,47	16,31
1,0	0,5	324,05	925,60	2478,96	896,50	717,40	383,56	621,50	100,48	714,78	446,30	556,48	1355,56	235,16	1331,32	508,67	33,67	214,78	10,01	177,49	144,86
	15	520,47	1320,38	1500,68	1071,20	790,16	343,45	599,69	144,55	532,14	188,56	402,87	1000,54	289,10	776,43	193,95	36,61	219,19	28,52	111,38	28,00
	30	364,03	1412,20	579,87	936,56	598,24	331,50	648,95	109,02	551,83	180,87	432,84	1158,37	195,0	915,80	168,66	25,21	153,14	6,56	69,58	23,33
	60	323,99	676,80	412,73	851,82	591,87	305,49	343,90	76,14	529,78	116,74	395,54	589,38	121,65	913,23	146,76	23,12	44,61	1,37	105,00	23,83
	90	244,18	497,10	548,34	748,73	488,40	396,95	393,61	130,18	528,46	163,53	375,68	501,71	133,61	802,10	162,50	20,64	19,30	1,27	69,31	25,28

No tratamento de maior período de incubação (90 dias), os solos apresentaram em média, valores de P recuperado pelos extratores na seguinte ordem: VEO (51 %), LAd₁ (20 %), NVdf (8 %), LAd₂ (6 %) e LVAd (2 %); da dose máxima (CMAP) aplicada. A relação entre a capacidade de adsorção de P e composição mineralógica dos solos estudados foi similar à seqüência citada por Fox & Searle (1978) para solos tropicais. O solo LVAd, predominantemente gibbsítico (Figura 1), apresentou os menores valores de P recuperado, divergindo de Bahia Filho et al.(1983), que considera a goethita como principal componente da fração argila responsável pela adsorção em solos do Brasil Central. Possivelmente, a maior capacidade de adsorção de P no maior tempo de incubação para o LVAd deve-se a maior presença de óxidos amorfos de Al, comuns em Latossolos muito intemperizados.

Buscando encontrar um relacionamento entre o P recuperado, doses aplicadas e diferentes tempos de incubação, ajustaram-se superfícies de resposta do P recuperado por diferentes extratores em função das doses aplicadas e dos tempos de incubação (Quadro 8). Os melhores ajustes (maior R²) ocorreram com o extrator Mehlich-3, porém, para todos os extratores observou-se um decréscimo do P recuperado com o tempo de incubação, como já observado por alguns pesquisadores (LARSEN et al.,1965; BARROW & SHAW,1975; GONÇALVES et al., 1989). Para melhor caracterizar este decréscimo, realizou-se um corte na superfície de resposta do P recuperado pelo extrator Mehlich-3 (Figura 2), comprovando-se que para qualquer solo, independentemente da dose aplicada, nos maiores tempos de incubação, obteve-se as menores recuperações de P.

A partir do P recuperado em função do P aplicado, foram estimadas as taxas de recuperação de P (Quadro 9). Entre os tempos de incubação e extratores, as taxas foram variáveis entre solos, indicando a influência do teor e características dos minerais da fração argila na adsorção de P.

Estas taxas correlacionaram-se com características do solo que refletem o “status”de P (Quadro 10). Como o teor de argila não refletiu satisfatoriamente o FCP (quadro 5) pela baixa significância do coeficiente de correlação linear simples ($p < 0,10$), comprovadamente a taxa de recuperação do P aplicado não se correlacionou com os teores de argila (Quadro 10), indicando a importância, sob o aspecto qualitativo, dos constituintes minerais da fração argila.

Quadro 8. Superfícies de resposta do fósforo recuperado (mg dm^{-3}) dos solos pelos extratores Mehlich-1, Mehlich-3, Bray-1, CaCl_2 0,01 mol L^{-1} em função do tempo de incubação (dias) e das doses aplicadas (mg dm^{-3})

Solo	Equação	R ²
Mehlich-1		
LAd ₁	$\hat{y} = 24,56 + 0,64^{***} x - 0,89^{**} y$	0,891
LAd ₂	$\hat{y} = -151,099 + 0,29^{\otimes} x + 0,00014^{*} x^2 + 10,87^{*} y - 0,11^{*} y^2 - 0,0037^{**} x y$	0,872
LVAd	$\hat{y} = 18,88 + 0,29^{\otimes} x + 0,00015^{*} x^2 - 11,12^{\otimes} y + 0,15^{*} y^2 - 0,0078^{***} x y$	0,866
NVdf	$\hat{y} = 34,049 + 0,20^{\otimes} x + 0,000077^{\otimes} x^2 - 1,40^{\otimes} y$	0,860
VEo	$\hat{y} = 405,99 + 1,031^{***} x + 4,15^{*} y - 0,045^{*} y^2 - 0,010^{*} x y$	0,675
Mehlich-3		
LAd ₁	$\hat{y} = 32,086 + 0,44^{***} x + 0,00039^{*} x^2 - 2,21^{**} y + 0,020^{**} y^2$	0,970
LAd ₂	$\hat{y} = 0,20 + 0,25^{***} x - 1,31^{**} y$	0,873
LVAd	$\hat{y} = 1,79 + 0,045^{***} x - 0,19^{\otimes} y$	0,856
NVdf	$\hat{y} = 18,68 + 0,087^{\otimes} x + 0,000066^{**} x^2 - 0,78^{*} y$	0,945
VEo	$\hat{y} = 54,96 + 0,72^{***} x - 1,039^{*} y$	0,627
Bray-1		
LAd ₁	$\hat{y} = 28,14 + 0,59^{***} x + 0,00056^{*} x^2 - 1,79^{*} y + 0,016^{*} y^2 - 0,0025^{**} x y$	0,967
LAd ₂	$\hat{y} = 36,17 + 0,44^{***} x - 3,43^{**} y$	0,806
LVAd	$\hat{y} = 26,86 + 0,077^{***} x - 0,98^{**} y$	0,770
NVdf	$\hat{y} = -34,30 + 0,42^{***} x - 1,94^{*} y$	0,897
VEo	$\hat{y} = 22,25 + 1,22^{***} x - 2,77^{\otimes} y + 0,035^{*} y^2 - 0,010^{*} x y$	0,702
CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹		
LAd ₁	$\hat{y} = -0,96 + 0,051^{***} x - 0,078^{**} y$	0,854
LAd ₂	$\hat{y} = -38,51 + 0,10^{***} x + 0,42^{\otimes} y - 0,0011^{***} x y$	0,822
LVAd	$\hat{y} = 1,26 + 0,0041^{**} x - 0,072^{*} y$	0,398
NVdf	$\hat{y} = -6,79 + 0,048^{***} x - 0,28^{\otimes} y$	0,656
VEo	$\hat{y} = -1,022 + 0,34^{***} x - 0,91^{\otimes} y + 0,011^{*} y^2 - 0,0037^{**} x y$	0,621

***, **, *, [⊗], ns significativo a 0,1%, 1%, 5%, 10% e não significativo, respectivamente. x - dose; y - tempo.

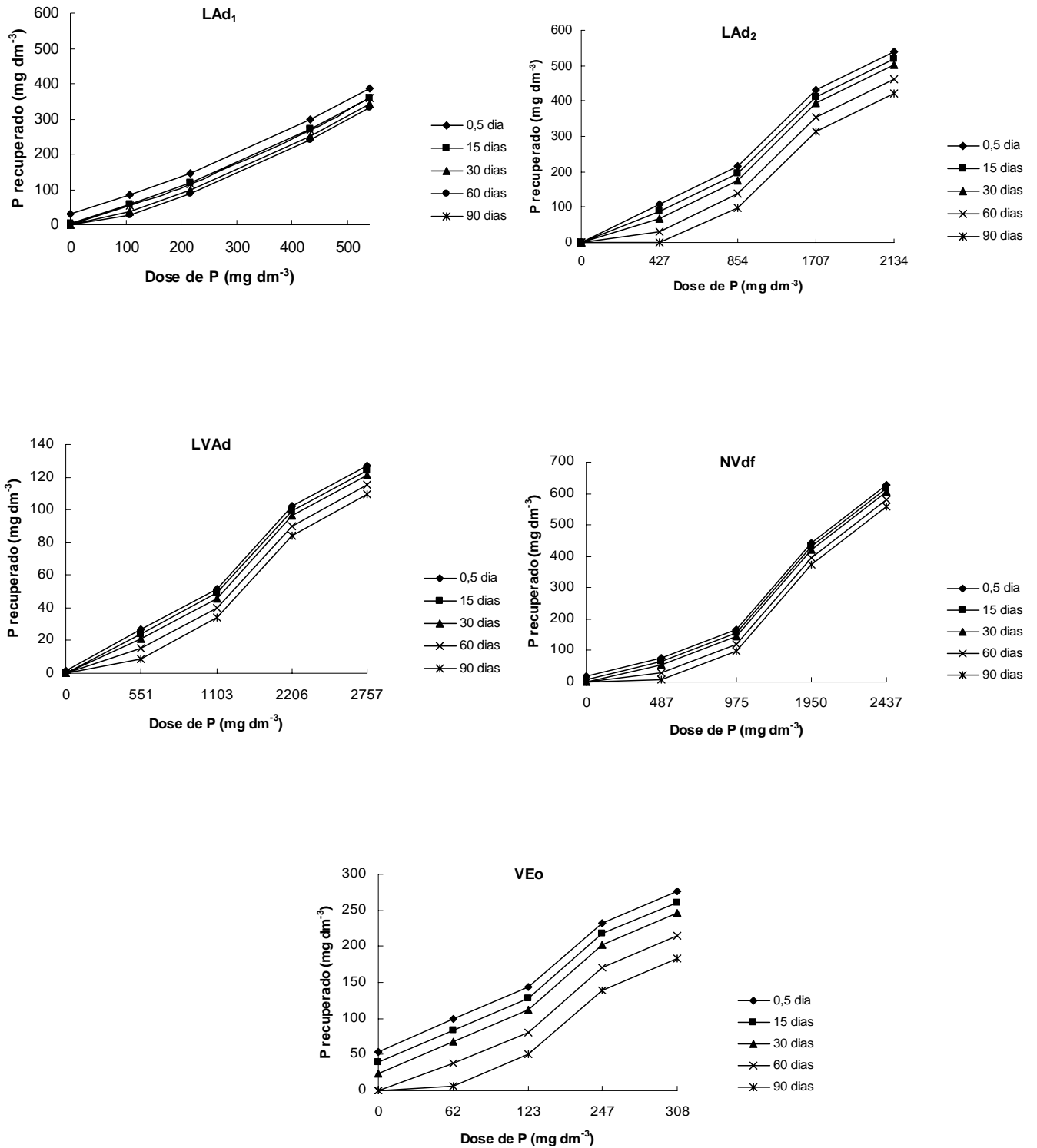


Figura 2. Cortes nas superfícies de resposta para o P recuperado dos solos em função das doses aplicadas nos diferentes tempos de incubação, para o extrator Mehlich-3.

Quadro 9- Taxa de recuperação de fósforo nos solos (mg dm⁻³/ mg dm⁻³) para os extratores Mehlich-1, Mehlich-3, Bray-1 e CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ em diferentes tempos de incubação

Solo	Incubação (dias)	Extrator			
		Mehlich-1	Mehlich-3	Bray-1	CaCl ₂
LAd ₁	0,5	$\hat{y} = 3,28 + 0,59^{***} x$	$\hat{y} = -5,22 + 0,74^{***} x$	$\hat{y} = -7,25 + 1,02^{***} x$	$\hat{y} = -4,18 + 0,066^{**} x$
	15	$\hat{y} = -32,89 + 0,93^{**} x$	$\hat{y} = -17,39 + 0,65^{***} x$	$\hat{y} = -15,84 + 0,71^{***} x$	$\hat{y} = -5,40 + 0,066^{**} x$
	30	$\hat{y} = 0,34 + 0,70^{***} x$	$\hat{y} = -1,17 + 0,62^{***} x$	$\hat{y} = -7,73 + 0,81^{***} x$	$\hat{y} = -3,31 + 0,037^{*} x$
	60	$\hat{y} = -22,62 + 0,57^{***} x$	$\hat{y} = -25,62 + 0,55^{**} x$	$\hat{y} = -36,92 + 0,74^{**} x$	$\hat{y} = -3,76 + 0,040^{*} x$
	90	$\hat{y} = -0,84 + 0,42^{***} x$	$\hat{y} = -26,82 + 0,73^{***} x$	$\hat{y} = -24,58 + 0,69^{***} x$	$\hat{y} = -3,31 + 0,037^{*} x$
LAd ₂	0,5	$\hat{y} = -108,58 + 0,45^{**} x$	$\hat{y} = -61,57 + 0,29^{**} x$	$\hat{y} = -161,55 + 0,65^{**} x$	$\hat{y} = -37,23 + 0,099^{*} x$
	15	$\hat{y} = -112,48 + 0,58^{**} x$	$\hat{y} = -55,94 + 0,26^{**} x$	$\hat{y} = -102,52 + 0,42^{*} x$	$\hat{y} = -35,78 + 0,092^{*} x$
	30	$\hat{y} = -113,41 + 0,74^{**} x$	$\hat{y} = -48,51 + 0,33^{***} x$	$\hat{y} = -90,80 + 0,60^{**} x$	$\hat{y} = -25,43 + 0,083^{***} x$
	60	$\hat{y} = -76,34 + 0,35^{**} x$	$\hat{y} = -46,27 + 0,18^{**} x$	$\hat{y} = -76,60 + 0,31^{**} x$	$\hat{y} = -7,86 + 0,022^{**} x$
	90	$\hat{y} = -49,46 + 0,22^{**} x$	$\hat{y} = -44,52 + 0,18^{**} x$	$\hat{y} = -58,59 + 0,23^{*} x$	$\hat{y} = -3,30 + 0,0083^{*} x$
LVAd	0,5	$\hat{y} = -407,16 + 0,95^{**} x$	$\hat{y} = -1,17 + 0,043^{**} x$	$\hat{y} = -3,20 + 0,087^{***} x$	$\hat{y} = -1,53 + 0,0032^{*} x$
	15	$\hat{y} = -182,73 + 0,54^{**} x$	$\hat{y} = -4,13 + 0,054^{***} x$	$\hat{y} = -15,11 + 0,11^{***} x$	$\hat{y} = -4,41 + 0,010^{**} x$
	30	$\hat{y} = -96,010 + 0,34^{\otimes} x$	$\hat{y} = -6,09 + 0,051^{*} x$	$\hat{y} = -18,83 + 0,10^{*} x$	$\hat{y} = -1,54 + 0,0052^{\otimes} x$
	60	$\hat{y} = -55,10 + 0,13^{*} x$	$\hat{y} = -7,61 + 0,030^{**} x$	$\hat{y} = -9,81 + 0,042^{**} x$	$\hat{y} = -0,23 + 0,00046^{*} x$
	90	$\hat{y} = -81,45 + 0,18^{*} x$	$\hat{y} = -10,65 + 0,047^{**} x$	$\hat{y} = -11,73 + 0,045^{**} x$	$\hat{y} = -0,20 + 0,00034^{\otimes} x$
NVdf	0,5	$\hat{y} = -60,0019 + 0,32^{**} x$	$\hat{y} = -59,22 + 0,28^{**} x$	$\hat{y} = -104,56 + 0,51^{**} x$	$\hat{y} = -27,21 + 0,060^{\otimes} x$
	15	$\hat{y} = -62,14 + 0,53^{**} x$	$\hat{y} = -45,72 + 0,26^{**} x$	$\hat{y} = -81,21 + 0,41^{*} x$	$\hat{y} = -20,38 + 0,068^{*} x$
	30	$\hat{y} = -90,59 + 0,40^{**} x$	$\hat{y} = -61,42 + 0,23^{**} x$	$\hat{y} = -105,92 + 0,40^{**} x$	$\hat{y} = -12,44 + 0,034^{**} x$
	60	$\hat{y} = -64,095 + 0,39^{**} x$	$\hat{y} = -52,13 + 0,24^{**} x$	$\hat{y} = -129,40 + 0,43^{**} x$	$\hat{y} = -18,060 + 0,049^{**} x$
	90	$\hat{y} = -106,59 + 0,33^{**} x$	$\hat{y} = -82,51 + 0,23^{**} x$	$\hat{y} = -130,42 + 0,35^{**} x$	$\hat{y} = -11,97 + 0,028^{*} x$
VEo	0,5	$\hat{y} = 318,68 + 1,30^{**} x$	$\hat{y} = -19,15 + 1,56^{**} x$	$\hat{y} = -30,04 + 1,82^{*} x$	$\hat{y} = -24,11 + 0,56^{**} x$
	15	$\hat{y} = 573,53 + 0,73^{**} x$	$\hat{y} = 16,31 + 0,56^{***} x$	$\hat{y} = -4,74 + 0,52^{*} x$	$\hat{y} = -1,87 + 0,088^{***} x$
	30	$\hat{y} = 484,30 + 0,52^{\otimes} x$	$\hat{y} = 23,50 + 0,68^{*} x$	$\hat{y} = 18,17 + 0,73^{*} x$	$\hat{y} = -2,88 + 0,16^{\otimes} x$
	60	$\hat{y} = 480,098 + 0,33^{\otimes} x$	$\hat{y} = 24,20 + 0,34^{**} x$	$\hat{y} = 23,15 + 0,45^{**} x$	$\hat{y} = -1,65 + 0,079^{**} x$
	90	$\hat{y} = 401,95 + 0,25^{\otimes} x$	$\hat{y} = 26,77 + 0,45^{**} x$	$\hat{y} = 14,68 + 0,47^{***} x$	$\hat{y} = -2,036 + 0,08^{**} x$

***, **, *, \otimes , ns: significativo a 0,1%, 1%, 5, 10% e não significativo, respectivamente.

Quadro 10. Coeficientes de correlação linear simples entre a taxa de recuperação de fósforo pelos extratores Mehlich-1, Mehlich-3, Bray-1 e CaCl_2 0,01 mol L^{-1} e características físicas e químicas dos solos

Característica	Taxa de recuperação
Argila	-0,34 ^{ns}
P rem ⁽¹⁾	0,92 [*]
CMAP ⁽²⁾	-0,98 ^{**}
EA ⁽³⁾	-0,75 [⊗]
FCP ⁽⁴⁾	-0,82 [*]

** , * , ⊗ , ns: significativo a 1, 5 e 10% e não significativo, respectivamente.

(1) Fósforo remanescente; (2) Capacidade máxima de adsorção de fósforo; (3) Energia de adsorção;

(4) Fator capacidade de fósforo.

A taxa de recuperação do P aplicado apresentou correlação positiva e significativa com o P rem e negativa e significativa com CMAP e FCP. Isto mais uma vez sugere que a determinação do P rem é a análise de rotina mais apropriada para indicar a interação do P com os minerais do solo da fração argila responsáveis pela adsorção deste elemento.

Para caracterizar a adsorção entre solos, ajustaram-se superfícies de resposta entre a taxa de recuperação do P aplicado pelos extratores Mehlich-1, Mehlich-3, Bray-1 e CaCl_2 0,01 mol L^{-1} em função de características de solos, como argila, CMAP e FCP nos diferentes tempos de incubação (Quadro 11). Como aconteceu com a variável P recuperado (Quadro 8), os melhores ajustes se ocorreram para o Mehlich-3. Assim, procedeu-se cortes na superfície de resposta deste extrator para melhor avaliar a tendência da taxa de recuperação do P aplicado em função do tempo de incubação para diferentes solos.

Os solos que apresentaram maiores adsorções de P foram o LVAd, LAd₂ e NVdf, indicadas pelas menores taxas de recuperação do P aplicado (Figura 3). Isto evidencia a alta capacidade adsorção de P por solos em solos com predominância de gibbsita, goethita e hematita na fração argila (Figura 1). A participação dos óxidos de alumínio no fenômeno de adsorção tem sido, de modo geral, menos destacada, apesar da gibbsita ter participação importante na adsorção de P, mesmo que de forma menos efetiva que a goethita (MCLAUGHLIN et al., 1981). Em razão de sua ocorrência em grandes quantidades em alguns Latossolos argilosos, sua contribuição, em termos de adsorção total, pode, todavia, ultrapassar à dos óxidos de ferro (CURI et al., 1988; MESQUITA FILHO & TORRENT, 1993).

No solo LAd₁, apesar da presença de goethita na fração argila (Figura 1), principal responsável pelo fenômeno da adsorção (BAHIA FILHO et al., 1983), a alta taxa de recuperação

do P aplicado indica uma pequena capacidade de adsorção deste solo. Os baixos teores de argila (Quadro 2) reduzem o potencial de adsorção do LAd₁. Isso não se deve a redução da ação da goethita, mas a limitação quantitativa deste constituinte mineral.

Para comprovar esta hipótese, observou-se a grande capacidade adsorativa do solo LAd₂ (Figura 3) que é mineralogicamente semelhante ao LAd₁ (Figura 1), porém apresenta 3,8 vezes mais argila que este.

Quadro 11. Superfície de resposta da taxa de recuperação do fósforo aplicado (mg dm⁻³) pelos extratores Mehlich-1, Mehlich-3, Bray-1 e CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ em função de argila (dag kg⁻¹), fator capacidade de fósforo (10⁻⁸ mol/cm³/upF), capacidade máxima de adsorção de fósforo (mg cm⁻³), fósforo remanescente (mg L⁻¹) e tempo de incubação (dia)

Extrator	Superfície de resposta	R ²
Mehlich-1	$\hat{y} = 0,88 - 0,0032^{\otimes} \text{argila} - 0,0052^{***} t$	0,465
	$\hat{y} = 0,97 - 0,0011^{**} \text{FCP} - 0,0078^{**} t + 0,000011^{\otimes} \text{FCP} \cdot t$	0,569
	$\hat{y} = 0,88 - 0,099^{**} \text{CMAP} - 0,0052^{***} t$	0,553
	$\hat{y} = 0,58 + 0,011^{**} \text{Prem} - 0,0037^{**} t - 0,00012^{\otimes} \text{Prem} \cdot t$	0,590
Mehlich-3	-	-
	$\hat{y} = 1,39 - 0,0074^{***} \text{FCP} + 0,000012^{**} \text{FCP}^2 - 0,012^{*} t + 0,000078^{\otimes} t^2 + 0,000013^{\otimes} \text{FCP} \cdot t$	0,718
	$\hat{y} = 1,12 - 0,34^{***} \text{CMAP} - 0,013^{**} t + 0,000078^{*} t^2 + 0,0023^{*} \text{CMAP} \cdot t$	0,760
	$\hat{y} = 0,25 + 0,040^{***} \text{Prem} - 0,00050^{\otimes} \text{Prem}^2 - 0,0071^{\otimes} t + 0,000078^{\otimes} t^2 - 0,00019^{**} \text{Prem} \cdot t$	0,755
Bray-1	-	-
	$\hat{y} = 1,45 - 0,0085^{***} \text{FCP} + 0,000016^{**} \text{FCP}^2 - 0,0039^{*} t$	0,595
	$\hat{y} = 1,32 - 0,35^{***} \text{CMAP} - 0,015^{**} t + 0,000080^{\otimes} t^2 + 0,0025^{*} \text{CMAP} \cdot t$	0,675
	$\hat{y} = 0,45 + 0,036^{*} \text{Prem} - 0,00061^{\otimes} \text{Prem}^2 - 0,0039^{*} t$	0,537
CaCl ₂	-	-
	$\hat{y} = 0,17 - 0,00025^{*} \text{FCP} - 0,0011^{*} t$	0,222
	$\hat{y} = 0,24 - 0,080^{**} \text{CMAP} - 0,0025^{*} t + 0,00086^{\otimes} \text{CMAP} \cdot t$	0,380
	$\hat{y} = 0,073 + 0,0035^{**} \text{Prem} - 0,0011^{*} t$	0,366

***, *, \otimes , .; significativo a 0,1; 1; 5; e 10%, respectivamente.

O VEO apresentou altas taxas de recuperação do P aplicado (Figura 3), entretanto, baixa capacidade de adsorção. Apesar dos seus elevados teores de argila (Quadro 2), mineralogicamente predominam argilominerais 2:1, pouco efetivos no processo de adsorção. No entanto, os elevados teores de cálcio deste solo (Quadro 2), contribuem efetivamente para o

processo de precipitação, que também é responsável pela indisponibilidade de P devido à formação de compostos de baixa solubilidade como os fosfatos de cálcio.

Comparando-se a capacidade de adsorção do LAd₁ e VEo percebe-se um comportamento semelhante dos dois solos (Figura 3). Isto evidencia a importância da precipitação do P em solos mais alcalinos, como o VEo, semelhantemente a capacidade adsortiva dos óxidos de ferro em solos ácidos menos argilosos, como no LAd₁.

Embora pequena, a reversibilidade de P não-lábil a P lábil tende a aumentar a cada período de incubação, sendo o P retido com menor energia à medida que a superfície de adsorção se satura (NOVAIS & SMYTH, 1999). Nos solos de menores valores de P rem e elevados valores de CMAP e FCP (LVAd, , LAd₂ e NVdf), percebeu-se uma tendência de aumento na taxa de recuperação do P aplicado a partir dos 60 dias de incubação. Isto sugere que as elevadas doses de P aplicadas e a rápida transferência do P lábil em P não-lábil contribuíram para a formação de um possível efeito residual de P, como observado aos 90 dias de incubação. Nos solos de maiores valores de P rem e menor FCP, CMAP (LAd₁ e VEo), a transformação de P lábil em P não-lábil, e, conseqüentemente, demorando mais tempo para atingir um possível efeito residual.

Ao contrário do observado por Gonçalves et al. (1989), o relacionamento matemático entre as taxas de recuperação do P aplicado baseado na CMAP dos solos, e os diferentes tempos de incubação, não caracterizou um decréscimo de natureza exponencial.

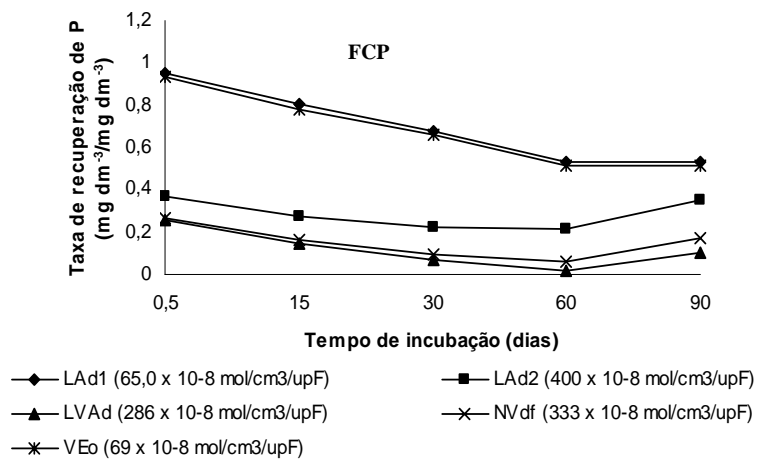
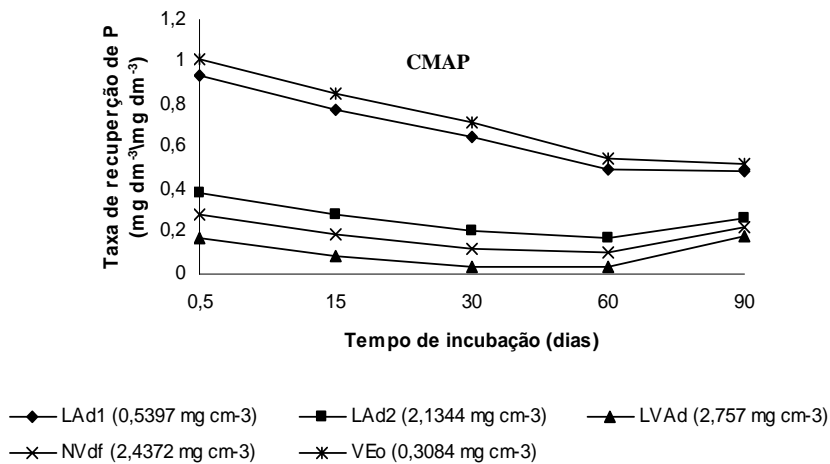
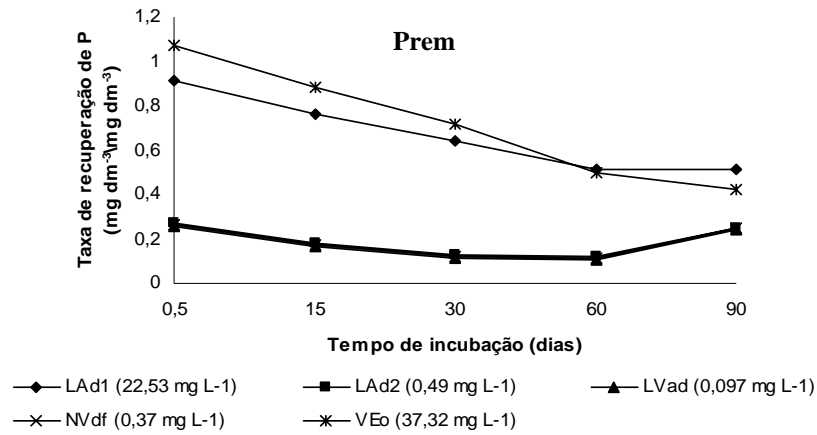


Figura 3. Cortes nas superfícies de resposta da taxa de recuperação do fósforo aplicado (mg dm⁻³) pelo extrator Mehlich-3 em função de argila (dag kg⁻¹), fator capacidade de fósforo (10⁻⁸ mol/cm³/upF), capacidade máxima de adsorção de fósforo (mg cm⁻³), fósforo remanescente (mg L⁻¹) e tempo de incubação (dia)

4 CONCLUSÕES

1. As características que melhor refletiram o fator capacidade de P (FCP) foram o P remanescente (P rem) e capacidade máxima de adsorção de P (CMAP).
2. As características que melhor refletiram a taxa de recuperação do P aplicado foram a CMAP e P rem e FCP.
3. Solos com maior CMAP, FCP e menor P rem, quando aplicadas doses baseadas em suas CMAP, apresentaram uma maior reversibilidade do P não lábil (P residual) em menor intervalo de tempo quando comparado a solos de menor CMAP, FCP e maior P rem.
4. A concentração de 60 mg L^{-1} de P, atualmente empregada para a determinação do P rem, parece insuficiente para correta caracterização de solos altamente intemperizados no que diz respeito ao seu potencial de adsorção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVAREZ V. V.H.et al. Determinação e uso do fósforo remanescente. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 25, p.27-32, 2000.

BAHIA FILHO, A.F.C. et al. Relação entre adsorção de fósforo e componentes mineralógicos da fração argila de Latossolos do planalto central. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.7, p. 221-226, 1983.

BARROW, N.J.; SHAW, T.C. The slow reactions between soil and anions: 2. Effect of time and temperature on the decrease in phosphate concentration in the soil solution. **Soil Science**, Baltimore, v. 119, p. 167-177, 1975.

BARROW, N.J. Reaction of anions and cations with variable-charge soils. **Advances in Agronomy**, New York, v. 38, p. 183-230, 1985.

SILVA, E.M.B. et al. Níveis críticos de fósforo para *Brachiaria brizantha* e suas relações com características físicas e químicas em solos de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.28, p. 72-77, 2004.

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

COFFIN, D.E. A method of determination of free iron in soil and clays. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 43, p. 7-17, 1963.

CURI, N. et al. Sorção de fósforo em materiais de Latossolos do Brasil Sudeste. In: REUNIÃO DE CLASSIFICAÇÃO, CORRELAÇÃO DE SOLOS E INTERPRETAÇÃO DA APTIDÃO AGRÍCOLA 3, 1988, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1988. p.267-282.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise do solo**. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

FOX, R.L.; SEARLE, P.G.E. Phosphate adsorption by soils of the tropics. In: DROSDOFF, M. Ed. Diversity of soils in the tropics. Madison: American Society of Agronomy, 1978. p. 97-119.

FREIRE, F.J. Sistema para cálculo do balanço nutricional e recomendação de corretivos e fertilizantes para cana-de-áçúcar.2001. 144f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas)- Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

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

HSU, P.H. Fixation of phosphate by aluminum and iron in acidic soils. *Soil Science*, Baltimore, v. 99, p. 398-402, 1965.

GONÇALVES, J.L.M.et al. Cinética de adsorção de fósforo em solos de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 9, p. 107-111, 1985.

GONÇALVES, J.L.M.et al. Cinética de transformação de fósforo-lábil em não-lábil, em solos de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 13, p. 13-24, 1989.

JACKSON, M.L. Soil chemical analysis-advanced course. Madison: University of Wisconsin, 1969.

LARSEN, S. Soil phosphorus. **Advance Agronomy**, New York, v. 19, p. 151-210, 1967.

McLAUGHLIN, R.R.; RYDEN, J.C.; SYERS, J.R. Sorption of inorganic phosphate by iron and aluminum containing components. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 32, p. 365-377,1981.

MESQUITA FILHO, M.V.; TORRENT, J. Phosphate sorption as related to mineralogy of a hydrosequence of soils from the Cerrado region (Brazil). **Geoderma**, Amsterdam, v. 58, p. 107-123, 1993.

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa, MG: UFV, 1999.399p.

PARFITT, R.L. Anion adsorption by soils and soil materials. *Advances in Agronomy*, New York, v. 30, p. 1-50, 1978.

POSNER, A.M.; BOWDEN, J.W. Adsorption isotherms: should they be split? **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 31, p. 1-10, 1980.

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

SCHWERTMANN, W. The differentiation of iron oxide in soils by a photochemical extraction with acid ammonium oxalate. **Z. Pflanzenernahr. Dung. Bodenkund**, 105:194-201, 1964.

VASCONCELLOS, C.A. et al. Fósforo em dois Latossolos do Estado de Mato Grosso: I Sorção de fosfato. **Experientiae**, v. 18, p. 267-285, 1974.

CAPÍTULO 2

NÍVEIS CRÍTICOS DE FÓSFORO EM SOLOS E PLANTA E SUAS RELAÇÕES COM A ADSORÇÃO DE FOSFATO

RESUMO

Utilizando-se amostras subsuperficiais de um Nitossolo Vermelho distroférico (NVdf), textura muito argilosa predominantemente hematítico e um Vertissolo Ebânico órtico (VEo), textura argilosa com predomínio de argilominerais 2:1, coletados na zona da mata e sertão do estado de Pernambuco, respectivamente; objetivou-se avaliar as relações entre os níveis críticos nos solos e em plantas de milho com a adsorção de P. As doses foram definidas em função dos níveis 0; 0,2; 0,4; 0,8 e 1,0 da CMAP de cada solo e incubadas de forma a ter, num mesmo e último dia, os diferentes períodos de equilíbrio solo-P satisfeitos. O experimento foi realizado em casa de vegetação em esquema fatorial (2 solos, 5 doses de P e 5 tempos de incubação) em delineamento de blocos casualizados com três repetições. O P disponível foi determinado pelos extratores Mehlich-1, Mehlich-3, Bray-1 e $\text{CaCl } 0,01 \text{ mol L}^{-1}$. O plantio de milho foi realizado no dia da última incubação. A colheita foi realizada aos trinta e cinco dias após a semeadura.. No NVdf os níveis críticos no solo e planta apresentaram tendência decrescente com o aumento do tempo de incubação até 60 dias, quando passaram a apresentar níveis críticos crescentes. No VEo, os níveis críticos no solo e na planta foram decrescentes com o aumento do tempo de incubação. A planta foi mais eficiente na utilização de P no solo de maior CMAP. Os extratores Bray-1 e Mehlich-3 foram os que melhor correlacionaram-se com o P absorvido e acumulado pelas plantas de milho

Palavras chave: P disponível, extratores de P, capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP).

ABSTRACT

CRITICAL LEVELS OF PHOSPHORUS IN SOILS AND PLANTS AND THEIR RELATIONSHIP WITH PHOSPHATE ADSORPTION

An experiment was carried out to evaluate the relationship between soils and corn plants critical levels of phosphorus and P adsorption. Subsurface samples of two contrasting soils were utilized, an Alfisol high in hematite and a Vertisol with predominance of 2:1 minerals, which were collected, respectively, from “Zona da Mata” and “Sertão”, physiographical regions of Pernambuco state, Brazil. Phosphorus doses were added as a function of 0; 0.2; 0.4; 0.8 and 1.0 levels of maximum phosphate adsorption capacity (MPAC) of each soil. The soil samples were incubated for different periods in order to reach the P adsorption equilibrium at the same day. The experiment consisted of block design factorial scheme, with 2 soils, 5 P doses, and 5 periods of incubation. Available P was estimated by Mehlich-1, Mehlich-3, Bray-1, and CaCl_2 0,01 mol L⁻¹ extractants. After the last incubation period, corn plants were cultivated during 35 days. In the Alfisol, the results showed that critical levels in both soil and plants decreased. On the other hand, the critical levels for the Vertisol diminished in accordance to the period of incubation. Corn plants were more efficient to utilize phosphorus in the soil with higher MPAC. Mehlich-3 and Bray-1 extractants were the best correlated to absorbed and accumulated phosphorus by corn plants.

Key words: available phosphorus, phosphorus extractants, maximum phosphate adsorption capacity (MPAC).

5 INTRODUÇÃO

O reconhecimento e a interpretação das características físicas, químicas e mineralógicas dos solos contribuem para a construção e, ou, manutenção da sua fertilidade, potencializando o uso de fertilizantes, dentre estes os fosfatados, mediante um suprimento adequado do elemento às culturas e obtenção de maiores produtividades.

A disponibilidade de P às plantas tem sido avaliada por diversas técnicas de extração, o que, de certa forma, é um indicativo da complexidade do comportamento do elemento no solo (LARSEN, 1967), assim como da falta de concordância sobre qual seria o método mais adequado (SILVA & RAIJ, 1999). A deficiência de P nos solos tropicais é intensificada devido a acidez e à presença de óxidos cristalinos e amorfos de Fe e Al. Tais minerais apresentam grupamentos superficiais Fe-OH e Al-OH, aos quais o fosfato pode ser adsorvido por meio de troca de ligantes (quimiossorção) com o estabelecimento de ligações covalentes, além disso, sua forma estrutural em adição à sua superfície específica influenciam na adsorção de fosfato pelos solos (MESQUITA FILHO & TORRENT, 1993). O processo de adsorção pode acontecer preferencialmente, segundo uma ordem de predomínio dos seguintes minerais: argilas 2:1 < argilas 1:1 < óxidos cristalinos de Fe e Al < óxidos amorfos de Fe e Al (FOX & SEARLE, 1978). Esta classificação, genericamente, indica que os solos mais intemperizados requerem maior quantidade de adubação fosfatada para um mesmo nível de P em solução. Em distintos ambientes pedológicos, o processo de precipitação também poderá contribuir para a indisponibilidade de P às plantas, onde íons fosfato formarão compostos de menor solubilidade com Al ou Fe em solos ácidos ou com Ca em solos neutros ou alcalinos (HSU, 1964).

As plantas necessitam do suprimento de P da solução do solo, representado pelo fator intensidade (I), que depende da reposição do P lábil, representado pelo fator quantidade (Q), ou reserva de P no solo. O fator capacidade de fósforo (FCP) ou poder tampão de fosfato, é definido pela razão de equilíbrio entre a quantidade de P (Q) e o P em solução (I) e representa uma medida da capacidade do solo em manter um determinado nível de P em solução. As características e a concentração do mineral no volume do solo explorado pelas raízes podem estabelecer uma situação competitiva desfavorável para a absorção do nutriente pela planta, pela rápida passagem do P lábil para P não-lábil. A maior ou menor competição entre planta e solo pelo P aplicado faz com que a planta se ajuste para utilizar o P que lhe é colocado à disposição, sendo mais eficiente

em utilizar o menor conteúdo de P acumulado na parte aérea em solos com maior capacidade máxima de adsorção de P (CMAP) (MUNIZ et al., 1985).

Teor ou nível crítico de um nutriente, corresponde a concentração mínima necessária para atingir o crescimento máximo ou para um percentual deste máximo, correspondendo, na realidade, a uma estreita zona de transição do que a um ponto definido (FRITZ, 1976) e, é variável entre solos e planta e entre plantas e solo e também em função dos teores de P aplicados e de outros nutrientes, calagem e demais tratamentos culturais (FAQUIN et al., 1995; FONSECA, et al. 1997). Para uma boa recomendação de uso de fertilizantes, deve-se conhecer o teor das formas disponíveis do nutriente, seu nível crítico e a declividade do nutriente disponível em função do nutriente aplicado no solo (ALVAREZ et al., 2000), bem como a eficiência na absorção e utilização do P pela planta (MUNIZ et al., 1985; ALVES, 1994).

Este trabalho objetivou avaliar o efeito da adsorção de P nos níveis críticos do elemento em solos com distintas características físicas, químicas e mineralógicas e, nos níveis críticos de P em plantas de milho cultivadas em casa de vegetação

6 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado em casa de vegetação do Centro de Pesquisa de Solos da Universidade Federal Rural de Pernambuco. Utilizaram-se amostras da camada subsuperficial de dois solos do estado de Pernambuco: Nitossolo Vermelho distroférrico (NVdf) textura muito argilosa e predomínio de óxidos de Fe (hematita) proveniente da zona da mata e coletado de 30-56 cm de profundidade; Vertissolo Ebânico órtico (VEo) textura argilosa e predomínio de minerais 2:1 (esmectita) proveniente do sertão e coletado de 5-25 cm de profundidade. As amostras foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira de 2 mm, tanto para a instalação do experimento como para as análises físicas e químicas, realizadas conforme EMBRAPA (1997) e Alvarez et al (2000)(Quadro1).

Quadro 1. Caracterização física e química das amostras dos solos estudados

Característica	Solo	
	NVdf	VEo
Areia (dag kg ⁻¹)	11,8	29,8
Silte (dag kg ⁻¹)	17,5	15,5
Argila (dag kg ⁻¹)	70,7	54,7
Ds (g.cm ⁻³) ⁽¹⁾	1,12	1,72
Dp (g.cm ⁻³) ⁽²⁾	2,89	2,56
Cond. hidráulica (cm.h ⁻¹)	5,81	0,38
Cc (%) ⁽³⁾	39,7	39,5
PMP (%) ⁽⁴⁾	29,6	27,5
pH H ₂ O (1:2,5)	4,4	6,8
pH KCl	4,1	5,2
P Mehlich-1 (mg.dm ⁻³)	2,36	495,6
P Mehlich-3 (mg.dm ⁻³)	3,5	26,0
P Bray-1 (mg.dm ⁻³)	0,4	15,4
P CaCl ₂ 0,01 mol L ⁻¹ (mg.dm ⁻³)	0,0	0,4
Na (cmolc.dm ⁻³)	0,03	1,39
K (cmolc.dm ⁻³)	0,02	0,3
Ca+Mg (cmolc.dm ⁻³)	1,2	72,7
Al (cmolc.dm ⁻³)	0,45	0,0
H+Al (cmolc.dm ⁻³)	5,85	1,48
m (%)	26,0	0,0
C org. (g kg ⁻¹)	0,76	5,8
P-rem (mg.L ⁻¹) ⁽⁵⁾	0,37	37,3
CMAP (mg.cm ⁻³) ⁽⁶⁾	2,44	0,31
EA (mg L ⁻¹) ⁻¹ (7)	1,11	0,35
FCP (10 ⁻⁸ mol/cm ³ /upF) ⁽⁸⁾	333,0	69,0
Fe _{ox} (dag kg ⁻¹) ⁽⁹⁾	0,38	0,17
Fe _d (dag kg ⁻¹) ⁽¹⁰⁾	5,83	0,25
Fe _{ox} / Fe _d	0,06	0,67

⁽¹⁾ Ds: densidade do solo; ⁽²⁾ Dp : densidade de partículas; ⁽³⁾Cc : capacidade de campo; ⁽⁴⁾PMP : ponto de murcha permanente; ⁽⁵⁾P-rem : fósforo remanescente; ⁽⁷⁾EA : energia de adsorção; ⁽⁸⁾FCP : fator capacidade de fósforo; ⁽⁹⁾Fe_{ox}: ferro oxalato; ⁽¹⁰⁾Fe_d: ferro ditionito

O fósforo remanescente (P rem) foi determinado de acordo com Alvarez. et. al. (2000).

Para avaliar a capacidade máxima de adsorção de P (CMAP), amostras de 2,5 cm³ de TFSA de cada solo receberam 11 diferentes doses de P (KH₂PO₄ p.a.), situadas no intervalo de 0 a 260 mg L⁻¹ para o NVdf e de 0 a 80 mg L⁻¹ para o VEO (ALVAREZ et al., 2000).

As doses foram aplicadas utilizando-se 25 mL de uma solução de equilíbrio (CaCl₂ 2H₂O 0,01 mol L⁻¹, contendo as diferentes doses de P), agitou-se em enlenmeyer de 125 mL por 24 horas, centrifugou-se por 5 minutos e filtrou-se, determinando-se a concentração de P no

sobrenadante por colorimetria (BRAGA & DEFELIPO, 1974). Utilizou-se a isoterma de Langmuir linearizada ($C/q = 1/ab + 1/bC$) para determinar a CMAP (b), expressa em mg cm^{-3} ; e a constante (a), relacionada com a energia de adsorção (EA), expressa em L mg^{-1} .

Para estimar o fator capacidade de P (FCP) das amostras foram determinados inicialmente, o fator intensidade (I) e o fator quantidade (Q). Foram utilizados 5 cm^3 de TFSA de cada solo, os quais receberam oito doses de P definidas de acordo com os valores de P rem de cada amostra, sendo de 0 a 12 mg L^{-1} para o VEO e de 0 a 160 mg L^{-1} para o NVdf (modificado de Alvarez V. et. al., 2000); aplicadas através de 50 mL de uma solução de equilíbrio ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ $0,01 \text{ mol L}^{-1}$). Agitou-se em enlenmeyer de 125 mL por 1 h, centrifugou-se a 3000 rpm por 5 minutos e filtrou-se, sendo a concentração de P do sobrenadante determinada por colorimetria (BRAGA & DEFELIPO, 1974) e transformada em potencial (I), expresso em upF (unidade potencial de fosfato). O fator (Q) foi calculado pela quantidade de P adsorvida, resultado da subtração entre o P adicionado (doses) e o que permaneceu na solução de equilíbrio. O FCP foi determinado estimando-se uma equação de regressão dos valores de (I) em função de (Q).

Amostras de 2 kg do NVdf receberam uma mistura de CaCO_3 e MgCO_3 , numa relação molar de 4:1 por um período de 60 dias, sendo a quantidade do corretivo estimada pela acidez potencial (H+Al) dos solos (FREIRE, 2001). No VEO não houve necessidade de correção.

O experimento consistiu de amostras de solos de 2 kg acondicionadas em sacos plásticos, que receberam doses de P aplicadas por meio de soluções de KH_2PO_4 , $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ e NaH_2PO_4 , correspondentes aos seguintes níveis da CMAP de cada solo: 0; 0,2; 0,4; 0,8; 1,0 (Quadro 2).

As amostras foram incubadas por 90, 60, 30, 15 e 0,5 dia e esses períodos de incubação foram iniciados em diferentes épocas de modo a se ter, num mesmo e último dia os diferentes períodos de equilíbrio solo-P satisfeitos. Durante o experimento, a umidade foi mantida a 80 % da capacidade de campo.

Quadro 2. Capacidade máxima de adsorção de fósforo, intervalo experimental e doses de fósforo aplicadas nos solos

Solo	CMAF ⁽¹⁾ mg cm^{-3}	Intervalo experimental mg dm^{-3}	Doses de P
NVdf	2,44	0 - 2437	0; 487; 975; 1950; 2437
VEo	0,31	0 - 308	0; 62; 123; 247; 308

⁽¹⁾CMAP= capacidade máxima de adsorção de fósforo.

No último dia de incubação, foram retiradas amostras de solo de cada saco plástico, de modo a obter-se 100 g de solo seco. A secagem foi realizada à 60° C em copos plásticos por 48 horas. Para cada tratamento, determinou-se o P recuperado pelos extratores Mehlich-1 (HCl 0,05 mol L⁻¹ + H₂SO₄ 0,0125 mol L⁻¹), 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), Bray-1 (HCl 0,025 mol L⁻¹ + NH₄F 0,03 mol L⁻¹) e CaCl₂ 2H₂O (0,01 mol L⁻¹), numa relação solo:extrator de 1:10 (4 cm³ de TFSA e 40 mL da solução extratora). A avaliação de P no extrato foi realizada por colorimetria, de acordo com Braga & Defelipo (1974).

Terminada a amostragem de todos os tratamentos, os sacos plásticos foram acondicionados em vasos plásticos e levados para a casa de vegetação. Foram dispostos em um arranjo fatorial 2 x 5 x 5 (dois solos, cinco doses de P e cinco tempos de incubação), com os tratamentos distribuídos em blocos ao acaso, com três repetições.

O plantio foi realizado no dia da última incubação, colocando-se 5 sementes de milho, cultivar BR 106, por vaso. Oito dias após, foi efetuado um desbaste, permanecendo 2 plantas por vaso. Quinze dias após o desbaste, realizou-se uma adubação com: 60; 1,2; 0,8; 1,5; 3,5; 0,15; e 4 mg dm⁻³ de S, Cu, B, Fe, Mn, Mo e Zn, respectivamente. Durante todo o período de cultivo, a umidade dos solos foi mantida próxima a capacidade de campo.

A colheita foi realizada aos 35 dias após a semeadura, cortando-se a parte aérea das plantas rente ao solo. O material colhido foi seco em estufa a 60° C por 72 horas, sendo a matéria seca pesada, triturada e mineralizada por uma mistura nítrico-perclórica (BATAGLIA et al., 1983), obtendo-se extratos nos quais foram determinados os teores de P por colorimetria (BRAGA & DEFELIPO, 1974).

Foram ajustadas equações de regressão para o teor de P e matéria seca da parte aérea das plantas, como variáveis dependentes das doses aplicadas e dos tempos de incubação. A partir de modelos de regressão, foram estimadas doses de P (DE) para obtenção de 90 % da produção máxima. Com base nas doses estimadas foram definidos os níveis críticos de P nos solos e na parte aérea de plantas de milho.

7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

7.1 P disponível pelos extratores Mehlich-1, Mehlich-3, Bray-1 e CaCl_2 0,01 mol L⁻¹ em função do tempo de incubação

O P disponível pelos extratores Mehlich-1, Mehlich-3, Bray-1 e CaCl_2 0,01 mol L⁻¹ aumentou com as doses de P aplicadas e diminuiu com o aumento do tempo de incubação nos solos NVdf e VEO (Quadro 3). No entanto, os extratores que mais recuperam P foram o Mehlich-1 no VEO e Mehlich-1 e Bray-1 no NVdf. Especificamente no caso do VEO, os elevados valores de P disponível deve-se, provavelmente, ao P ligado a Ca (P-Ca), em consequência dos altos teores de Ca + Mg apresentados por este solo (Quadro 1) e pela capacidade do Mehlich-1 em solubilizar estes compostos.

O P disponível no VEO, independentemente do extrator, é maior do que no NVdf nos menores níveis de P aplicado. A partir da dose corresponde ao nível 0,4 da CMAP, o P disponível no NVdf passa a ser maior do que no VEO, com exceção do extrator Mehlich-1. Isto, provavelmente, ocorre pela diminuição da velocidade de transformação do P-lábil em P-não lábil e, conseqüentemente, pelo acúmulo de P-lábil mais susceptível aos extratores.

Para estimar os teores de P recuperado em função das doses de P aplicadas e tempos de incubação, ajustaram-se modelos lineares (Quadro 4). Observou-se que as menores taxas de recuperação do P aplicado foram obtidas para o NVdf, condizente com sua alta CMAP, alto valor de FCP e baixo valor de P rem (Quadro 1).

Quadro 3. Fósforo disponível pelos extratores Mehlich-1, Mehlich-3, Bray-1 e CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ nos diferentes níveis de fósforo aplicado e tempos de incubação

Nível	Tempo dias	Mehlich-1		Mehlich-3		Bray-1		CaCl ₂ 0,01 mol L ⁻¹	
		mg dm ⁻³							
		NVdf	VEo	NVdf	VEo	NVdf	VEo	NVdf	VEo
0	0,5	1,83	362,34	5,00	28,46	0,65	20,07	0,00	0,00
	15	2,92	593,23	4,07	23,37	0,15	11,12	0,17	0,52
	30	2,73	545,44	4,94	29,50	0,45	16,05	0,00	0,52
	60	2,40	524,42	1,33	20,14	0,42	15,39	0,03	0,72
	90	1,94	452,90	2,03	28,48	0,34	14,42	0,00	0,47
	Média	2,36	495,67	3,47	25,99	0,40	15,41	0,09	0,45
0,2	0,5	93,97	384,30	48,88	67,47	114,30	70,77	0,21	2,98
	15	132,23	578,11	43,31	42,95	45,81	28,61	0,53	1,80
	30	56,93	464,74	26,14	52,86	34,39	50,77	0,00	1,91
	60	87,10	441,28	30,64	43,32	21,01	51,63	0,21	2,04
	90	19,58	368,31	7,43	53,60	3,67	44,75	0,15	2,16
	Média	77,96	447,35	31,28	52,04	43,84	49,31	0,22	2,18
0,4	0,5	224,30	412,67	174,03	84,66	327,98	100,58	9,00	6,24
	15	345,54	681,17	141,66	83,05	194,49	45,13	6,48	8,23
	30	212,56	480,96	96,66	88,46	176,71	94,16	1,61	6,26
	60	224,23	526,41	124,90	70,93	120,21	85,61	3,80	5,70
	90	76,01	409,64	35,23	79,40	44,28	73,30	0,20	5,30
	Média	216,53	502,17	114,50	81,30	172,73	79,76	4,22	6,35
0,8	0,5	411,56	681,09	403,64	432,63	742,70	502,11	30,36	142,16
	15	1289,72	771,85	629,30	159,67	978,73	85,17	180,96	17,66
	30	708,55	723,80	399,80	273,21	683,00	305,92	65,65	74,06
	60	796,03	566,63	458,48	121,88	860,80	150,40	87,50	18,47
	90	556,16	481,02	409,42	143,68	551,01	130,02	34,47	16,31
	Média	752,40	644,88	460,13	226,21	763,25	234,72	79,79	53,73
1,0	0,5	896,50	717,40	714,78	446,30	1331,32	508,67	177,49	144,86
	15	1071,20	790,16	532,14	188,56	776,43	193,95	111,38	28,00
	30	936,56	598,24	551,83	180,87	915,80	168,66	69,58	23,33
	60	851,82	591,87	529,78	116,74	913,23	146,76	105,00	23,83
	90	748,73	488,40	528,46	163,53	802,10	162,50	69,31	25,28
	Média	900,96	637,21	571,40	219,20	947,78	236,11	94,55	245,30

Quadro 4. Equações de regressão ajustadas para os teores de fósforo no solo (mg dm^{-3}) recuperados pelos extratores Mehlich-1, Mehlich-3, Bray-1 e CaCl_2 $0,01 \text{ mol L}^{-1}$, como variável dependente das doses de fósforo aplicadas (mg dm^{-3}) em diferentes tempos de incubação

Tempo (dias)	Solo			
	NVdf		VEo	
	Mehlich-1			
0,5	$\hat{y} = -60,0019 + 0,32^{**}ds$	$R^2=0,884$	$\hat{y} = 318,68 + 1,30^{**}ds$	$R^2=0,930$
15	$\hat{y} = -62,14 + 0,53^{**}ds$	$R^2=0,890$	$\hat{y} = 573,53 + 0,73^{**}ds$	$R^2=0,930$
30	$\hat{y} = -90,59 + 0,40^{**}ds$	$R^2=0,969$	$\hat{y} = 484,29 + 0,52^{\otimes}ds$	$R^2=0,418$
60	$\hat{y} = -64,093 + 0,39^{**}ds$	$R^2=0,960$	$\hat{y} = 480,095 + 0,33^{\otimes}ds$	$R^2=0,571$
90	$\hat{y} = -106,59 + 0,33^{**}ds$	$R^2=0,926$	$\hat{y} = 401,95 + 0,25^{\otimes}ds$	$R^2=0,422$
	Mehlich-3			
0,5	$\hat{y} = -59,22 + 0,28^{**}ds$	$R^2=0,936$	$\hat{y} = -19,15 + 1,56^{**}ds$	$R^2=0,914$
15	$\hat{y} = -45,72 + 0,26^{**}ds$	$R^2=0,885$	$\hat{y} = 16,31 + 0,56^{**}ds$	$R^2=0,993$
30	$\hat{y} = -61,42 + 0,23^{**}ds$	$R^2=0,951$	$\hat{y} = 23,50 + 0,68^{**}ds$	$R^2=0,754$
60	$\hat{y} = -52,13 + 0,24^{**}ds$	$R^2=0,962$	$\hat{y} = 24,20 + 0,34^{**}ds$	$R^2=0,951$
90	$\hat{y} = -82,51 + 0,23^{**}ds$	$R^2=0,911$	$\hat{y} = 26,77 + 0,45^{**}ds$	$R^2=0,996$
	Bray-1			
0,5	$\hat{y} = -104,56 + 0,51^{**}ds$	$R^2=0,937$	$\hat{y} = -30,039 + 1,82^{**}ds$	$R^2=0,920$
15	$\hat{y} = -81,21 + 0,41^{**}ds$	$R^2=0,856$	$\hat{y} = -4,74 + 0,52^{**}ds$	$R^2=0,840$
30	$\hat{y} = -105,92 + 0,40^{**}ds$	$R^2=0,958$	$\hat{y} = 18,17 + 0,73^{**}ds$	$R^2=0,670$
60	$\hat{y} = -129,40 + 0,43^{**}ds$	$R^2=0,916$	$\hat{y} = 23,15 + 0,45^{**}ds$	$R^2=0,956$
90	$\hat{y} = -130,42 + 0,35^{**}ds$	$R^2=0,905$	$\hat{y} = 14,68 + 0,47^{**}ds$	$R^2=0,999$
	CaCl_2 $0,01 \text{ mol L}^{-1}$			
0,5	$\hat{y} = -27,21 + 0,060^{\otimes}ds$	$R^2=0,645$	$\hat{y} = -24,11 + 0,56^{**}ds$	$R^2=0,875$
15	$\hat{y} = -20,38 + 0,068^{**}ds$	$R^2=0,706$	$\hat{y} = -1,87 + 0,088^{**}ds$	$R^2=0,959$
30	$\hat{y} = -12,44 + 0,034^{**}ds$	$R^2=0,874$	$\hat{y} = -2,88 + 0,16^{\otimes}ds$	$R^2=0,453$
60	$\hat{y} = -18,060 + 0,049^{**}ds$	$R^2=0,895$	$\hat{y} = -1,65 + 0,079^{**}ds$	$R^2=0,966$
90	$\hat{y} = -11,97 + 0,028^{**}ds$	$R^2=0,840$	$\hat{y} = -2,036 + 0,080^{**}ds$	$R^2=0,950$

***, **, *, \otimes , ^{ns}: significativo a 0,1%; 1%; 5%; 10% de probabilidade e não significativo, respectivamente.
ds: dose de P aplicada (mg dm^{-3})

7.2 Matéria seca da parte aérea de milho e doses estimadas de P para 90 % da produção máxima

O relacionamento entre a produção de matéria seca e as doses de P aplicadas nos solos NVdf e VEO segue a lei dos incrementos decrescentes da fertilidade dos solos (Lei de Mitscherlich) (Quadro 5), permitindo ajustes na curva de produção de matéria seca em função das doses de P aplicadas nos dois solos (Quadro 6).

Independentemente do tempo de incubação, no NVdf foi produzida mais matéria seca do que no VEO (Quadro 5).

Quadro 5. Produção de matéria seca da parte aérea de milho em função das doses de fósforo aplicadas nos diferentes tempos de incubação

Solo	Dose (mg dm ⁻³)	Tempo de incubação (dias)				
		0,5	15	30	60	90
		Matéria seca(g/vaso)				
NVdf	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	487	12,81	21,32	24,48	16,81	19,46
	975	15,69	18,20	23,90	26,13	20,00
	1950	12,85	19,50	24,10	25,60	24,48
	2437	14,05	14,20	21,31	25,41	26,00
	Média		11,08	14,64	18,75	18,79
VEo	0	3,62	5,48	5,47	5,48	3,04
	62	11,53	12,10	8,87	9,15	11,73
	123	12,70	15,85	12,56	10,63	12,96
	247	14,43	12,63	8,9	12,36	9,00
	308	7,82	14,55	10,95	9,26	12,80
	Média		10,0	12,12	9,35	9,37

Isto se deve ao maior P disponível estimado pelos extratores Mehlich-1, Mehlich-3, Bray-1 e CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ no solo NVdf (Quadro 3). Alguns pesquisadores (NOVAIS & SMITH, 1999; SILVA, 2002), mostram que em solo com maior CMAP, alto FCP e baixo valor de P rem, como o NVdf, a produção de matéria seca é maior, sugerindo uma maior eficiência na utilização de P.

A produção de matéria seca aumentou, em relação as doses aplicadas, com o tempo de incubação no NVdf e manteve-se praticamente constante no VEO (Quadro 5). No NVdf, mesmo havendo redução no P disponível pelos extratores Mehlich-1, Mehlich-3, Bray-1 e CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ com o aumento do tempo de incubação, houve aumento na produção de matéria seca, justificando-se, possivelmente, pela maior eficiência na utilização do P disponível. Segundo Novais & Smith (1999), dados disponíveis na literatura têm mostrado grande ajuste da planta à utilização do P em solo com elevada CMAP.

Com a produção de matéria seca da parte aérea em função das doses de P aplicadas nos diferentes tempos de incubação, foram obtidas equações de regressão, ajustando-se modelos quadráticos e base raiz quadrada (Quadro 6). A partir dessas equações, estimaram-se as

produções correspondentes a 90% da produção máxima (ALVAREZ V. et al., 1988; FONSECA et al., 1997).

Quadro 6. Equações de regressão ajustadas para produção de matéria seca de milho (g/vaso) como variável dependente das doses de fósforo aplicadas (mg dm^{-3}) nos diferentes tempos de incubação

Solo	Tempo(dias)	Equações	R ²
NVdf	0,5	$\hat{y} = 0,048 + 0,84^* \sqrt{ds} - 0,011^* ds$	0,975
	15	$\hat{y} = 0,27 + 1,31^* \sqrt{ds} - 0,020^* ds$	0,946
	30	$\hat{y} = 0,27 + 1,50^{**} \sqrt{ds} - 0,021^* ds$	0,984
	60	$\hat{y} = -0,36 + 1,17^* \sqrt{ds} - 0,013^* ds$	0,974
	90	$\hat{y} = 0,32 + 1,0055^* \sqrt{ds} - 0,010^* ds$	0,982
VEo	0,5	$\hat{y} = 3,78 + 0,13^* ds - 0,00037^* ds^2$	0,927
	15	$\hat{y} = 5,40 + 1,35^* \sqrt{ds} - 0,050^{\otimes} ds$	0,894
	30	$\hat{y} = 5,36 + 0,84^{\otimes} \sqrt{ds} - 0,032^{ns} ds$	0,712
	60	$\hat{y} = 5,37 + 0,070^* ds - 0,00018^* ds^2$	0,953
	90	$\hat{y} = 3,24 + 1,48^{\otimes} \sqrt{ds} - 0,059^{ns} ds$	0,822

** , * , [⊗] , ^{ns}: significativo a 1, 5, 10% de probabilidade e não significativo respectivamente.
ds: doses de P aplicadas (mg dm^{-3})

As doses de P estimadas para 90% da produção máxima (DE) apresentaram tendência crescente com o tempo de incubação no NVdf e decrescente no VEO (Figura 1). Tal comportamento justifica-se pelo crescente aumento de produção de matéria seca no NVdf e decréscimo no VEO (Quadro 5).

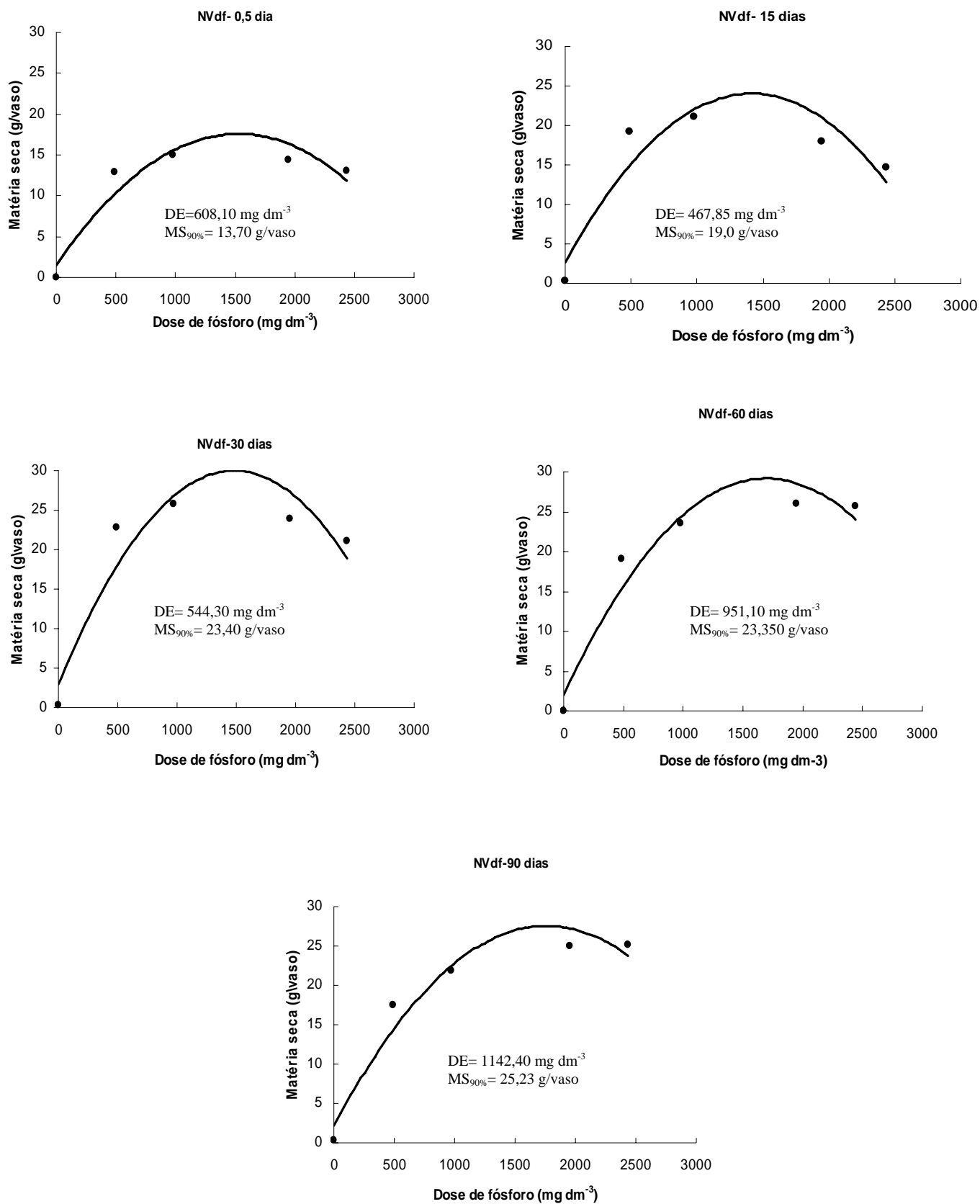


Figura 1. Doses de P estimadas para a 90 % da produção máxima de matéria seca no Nitossolo Vermelho distroférrico (NVdf).

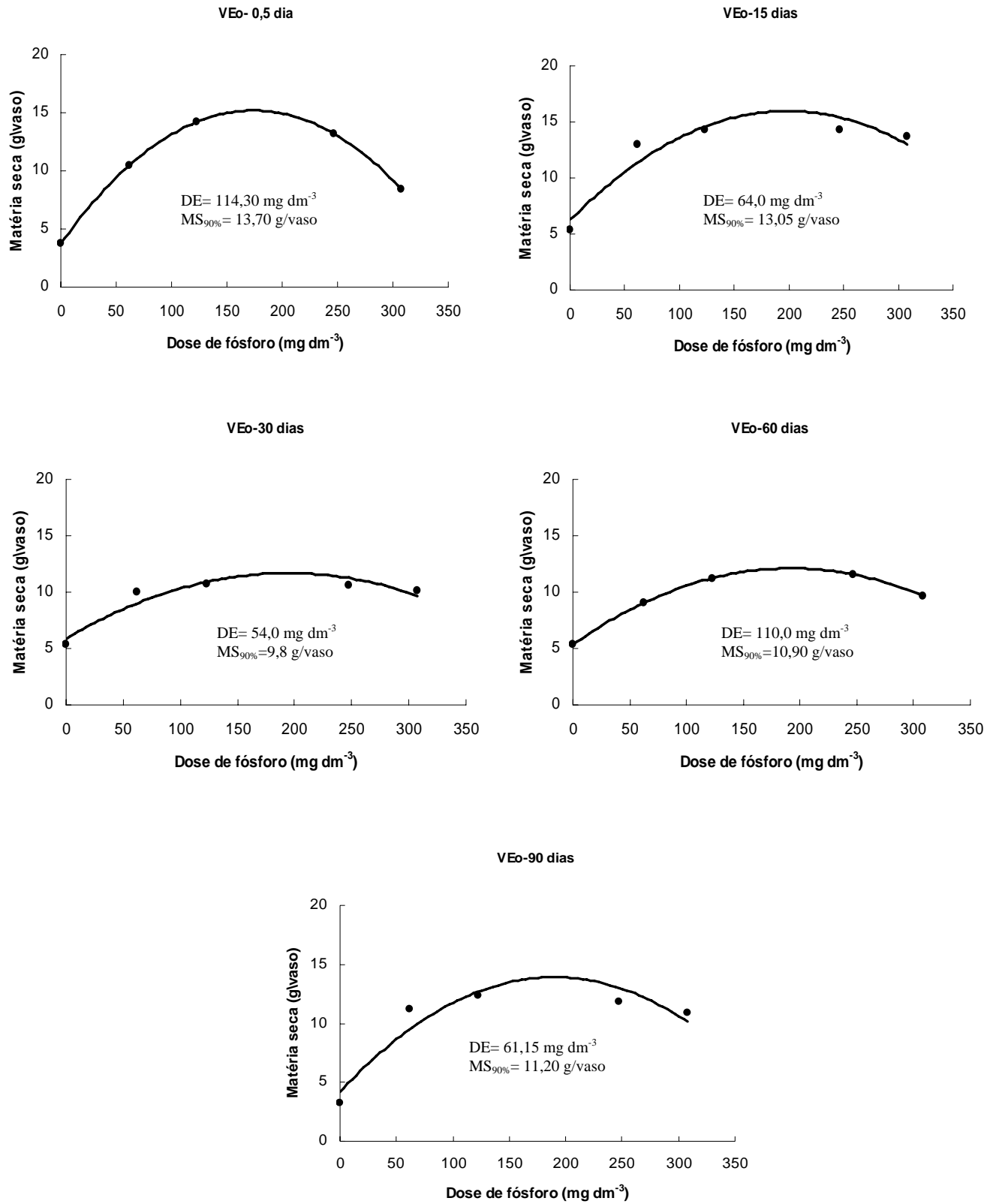


Figura 2. Doses de P estimadas para 90 % da produção máxima de matéria seca no Vertissolo Ebânico órtico (VEo).

7.3 Níveis críticos de P nos solos

A partir das doses de P estimadas para 90% da produção máxima (Figuras 1 e 2) e das equações ajustadas entre os teores de P recuperados pelos extratores Mehlich-1, Mehlich-3, Bray-1 e CaCl_2 0,01 mol L⁻¹ em função das doses de P aplicadas nos diferentes tempos de incubação (Quadro 4), estimaram-se os níveis críticos de P nos solos (Quadro 7).

O nível crítico de P no NVdf foi, em média, menor do que no VEo (Quadro 7), pela elevada CMAP, menor valor de Prem e maior FCP daquele solo (Quadro 1), corroborando com a literatura (BAHIA FILHO et al., 1982; NOVAIS & SMYTH, 1999; SILVA et al., 2004).

Os níveis críticos no NVdf foram decrescentes com o aumento do tempo de incubação. Entretanto, a partir de 60 dias, estes níveis críticos passaram a ser maiores. Este aumento justifica-se pela elevação da taxa de recuperação do P aplicado aos 60 e 90 dias após a incubação do solo (Figura 3, Capítulo I). É como se a partir dos 60 dias, os sítios de adsorção estivessem ocupados, fazendo com que o NVdf apresentasse um comportamento semelhante a solos arenosos de baixos valores de FCP, altos valores de Prem e baixas CMAP. Alguns pesquisadores (LOGANATHAN & FERNANDO, 1980; SINGH et al., 1983.), mostraram que quando se aplica uma fonte solúvel de P em um solo, freqüentemente grande parte do aplicado é adsorvido rapidamente. Segundo Gonçalves et al. (1985) a velocidade de adsorção é maior em solos com maior CMAP e, quanto maior a saturação dos sítios de adsorção, menor a velocidade de transformação de P lábil em P não lábil. Esta condição pode ser comparada com uma situação de campo, em que há ao longo de cultivos sucessivos um acúmulo de P e, conseqüentemente, um significativo efeito residual, fazendo com que os níveis críticos sejam maiores com o aumento do P residual.

Com os níveis críticos no solo em função do tempo de incubação não foi possível o ajuste de um modelo matemático que representasse o fenômeno no NVdf. É como se houvesse duas linhas de tendência, uma decrescente até os 60 dias e outra ascendente após esta fase. Para o VEo, ajustou-se modelos curvilíneos (raiz quadrada), evidenciando a redução dos níveis críticos com o tempo de incubação do solo (Figura 3), condizente com a decrescente redução da taxa de recuperação do P aplicado (Figura 3, Capítulo I).

Quadro 7. Níveis críticos de fósforo nos solos pelos extratores Mehlich-1, Mehlich-3, Bray-1 e CaCl_2 0,01 mol L^{-1} , para obtenção de 90% da produção máxima na planta nos diferentes tempos de incubação

Solo	Extrator	Níveis críticos de fósforo no solo (mg dm^{-3})				
		Tempo de incubação (dias)				
		0,5	15	30	60	90
NVdf	Mehlich-1	140,45	190,00	130,00	307,00	271,40
	Mehlich-3	111,50	80,60	67,60	176,50	190,00
	Bray-1	211,45	111,00	112,00	365,60	270,60
	CaCl_2	9,50	11,70	6,10	37,30	20,05
	Média	118,22	98,32	78,90	221,6	188,0
VEo	Mehlich-1	467,60	620,80	513,00	517,30	417,70
	Mehlich-3	159,25	52,30	60,50	61,65	54,40
	Bray-1	178,80	28,80	58,00	72,80	43,70
	CaCl_2	40,25	3,80	5,90	7,10	2,90
	Média	211,50	176,40	159,30	164,70	130,0

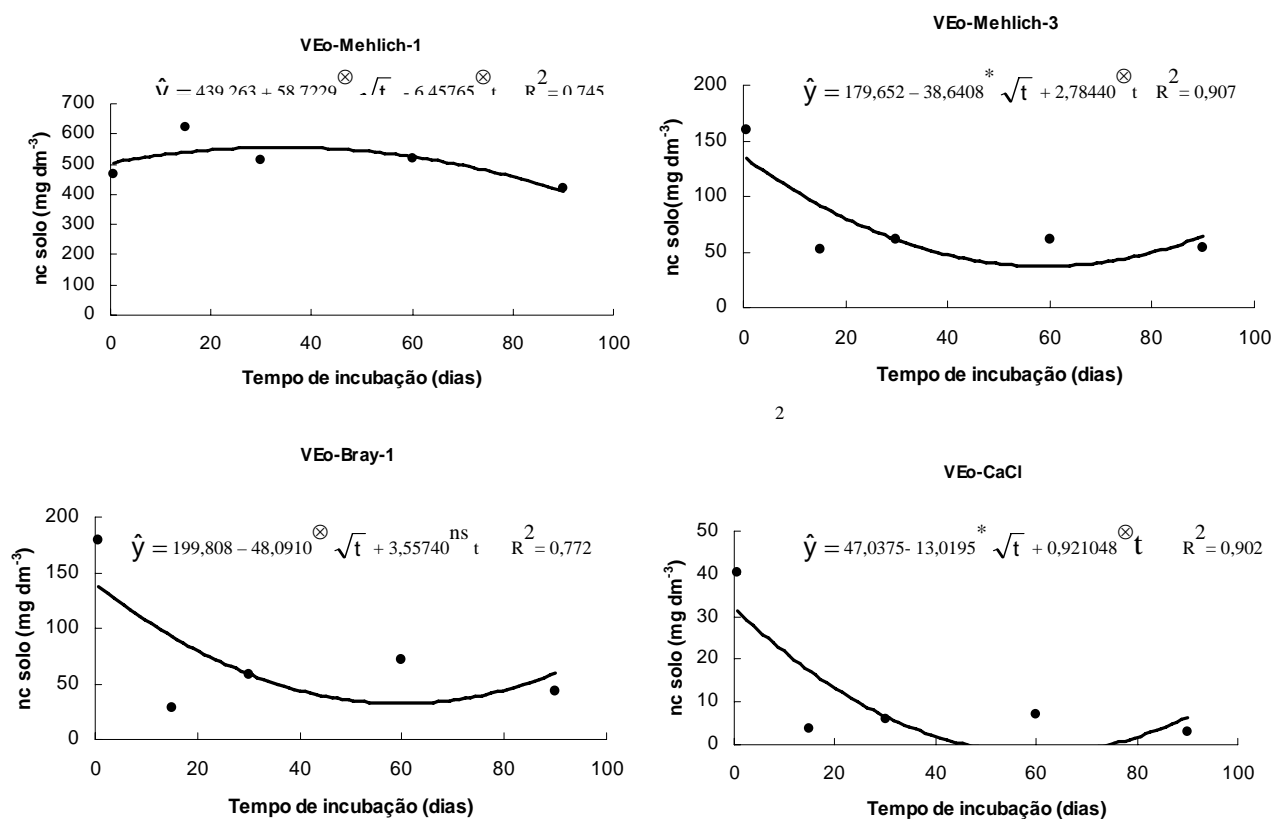


Figura 3. Níveis críticos de fósforo (mg dm^{-3}) pelos extratores Mehlich-1, Mehlich-3, Bray-1 e CaCl_2 0,01 mol L^{-1} no Vertissolo Ebânico órtico (VEo)

7.4 Níveis críticos de P nas plantas

Independentemente do tempo de incubação, os teores de P nas plantas de milho cultivadas no NVdf foram maiores do que no VEO.(Quadro 8).

Quadro 8. Teores de fósforo na matéria seca da parte aérea de milho em função das doses de fósforo aplicadas nos diferentes tempos de incubação

Solo	Dose (mg dm ⁻³)	Teores de fósforo (dag kg ⁻¹)					Média
		Tempo de incubação (dias)					
		0,5	15	30	60	90	
NVdf	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	487	0,332	0,270	0,251	0,255	0,251	0,272
	975	0,518	0,386	0,348	0,336	0,237	0,365
	1950	1,104	1,080	0,792	0,720	0,874	0,914
	2437	1,478	1,252	1,159	0,929	0,818	1,1270
Média		0,6864	0,5976	0,510	0,448	0,436	
VEo	0	0,148	0,128	0,125	0,135	0,106	0,130
	62	0,255	0,262	0,192	0,133	0,217	0,212
	123	0,308	0,340	0,277	0,321	0,189	0,287
	247	0,290	0,538	0,434	0,453	0,318	0,406
	308	0,495	0,522	0,467	0,420	0,502	0,481
Média		0,2992	0,358	0,299	0,2924	0,2664	

Isto se deve ao maior P disponível estimado pelos extratores Mehlich-1, Mehlich-3, Bray-1 e CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ no solo NVdf (Quadro 3), que refletiu tanto na maior produção de matéria seca, como nos teores de P na parte aérea do milho.

Em ambos os solos houve redução nos teores de P com o tempo de incubação (Quadro 8), justificando-se pelo decréscimo do P disponível em função do tempo (Quadro 3). Mesmo assim, houve aumento na produção de matéria seca (Quadro 5), principalmente no NVdf, enfatizando, possivelmente, o maior ajuste metabólico do milho neste solo, refletindo-se numa maior eficiência de utilização de P.

Para melhor entender as relações dos teores de P nas plantas nos diferentes solos, realizou-se cortes em superfícies de resposta ajustadas entre teores de P nas plantas em função das doses aplicadas nos diferentes tempos de incubação (Figura 4). No NVdf observou-se diminuição dos teores de P nas plantas em função do tempo, principalmente nas maiores doses aplicadas, que pode ser explicado pela elevada velocidade de adsorção deste solo, demonstrada pela amplitude entre o menor e o maior tempo de incubação. Contrariamente, no VEO, como a

velocidade de adsorção é reduzida, essa amplitude praticamente não existe, independente da dose aplicada.

A partir das doses de P estimadas para 90% da produção máxima (Figuras 1 e 2) e das equações ajustadas entre os teores de P na planta em função das doses aplicadas nos diferentes tempos de incubação (Quadro 9), estimaram-se os níveis críticos de P nas plantas (Quadro 10).

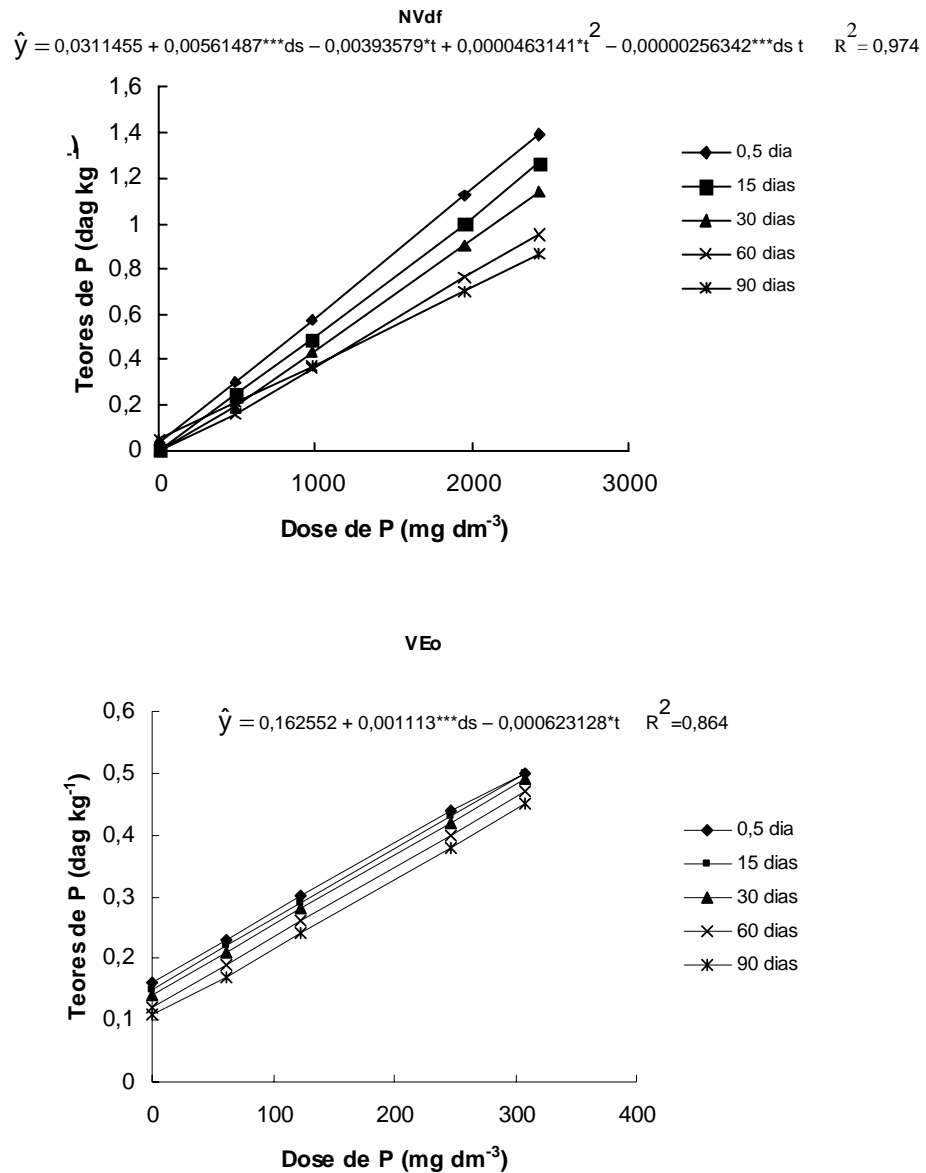


Figura 4. Cortes nas superfícies de resposta relacionando-se os teores de fósforo na planta (dag kg⁻¹) com doses e tempo de incubação

Quadro 9. Equações de regressão ajustadas para os teores de fósforo (dag kg^{-1}) em milho, como variável dependente das doses de fósforo aplicadas (mg dm^{-3}) nos diferentes tempos de incubação

Solo	Tempo (dias)	Equações	R ²
NVdf	0,5	$\hat{y} = -0,0025 + 0,00058^{***}ds$	0,994
	15	$\hat{y} = -0,023 + 0,00053^{***}ds$	0,984
	30	$\hat{y} = -0,018 + 0,00045^{***}ds$	0,977
	60	$\hat{y} = 0,018 + 0,00036^{***}ds$	0,989
	90	$\hat{y} = 0,0063 + 0,00036^{*}ds$	0,916
VEo	0,5	$\hat{y} = 0,17 + 0,00086^{*}ds$	0,768
	15	$\hat{y} = 0,12 + 0,0023^{*}ds - 0,0000032^{\otimes}ds^2$	0,983
	30	$\hat{y} = 0,12 + 0,0011^{***}ds$	0,990
	60	$\hat{y} = 0,12 + 0,0011^{*}ds$	0,866
	90	$\hat{y} = 0,10 + 0,0011^{**}ds$	0,876

**, *, [⊗]: significativo a 1, 5, 10% de probabilidade respectivamente
 ds: doses de P aplicadas (mg dm^{-3})

Quadro 10. Níveis críticos de fósforo nas plantas, para obtenção da produção máxima econômica nos diferentes tempos de incubação

Solo	Tempo (dias)	Níveis críticos de fósforo nas plantas (dag kg^{-1})
NVdf	0,5	0,36
	15	0,22
	30	0,23
	60	0,37
	90	0,43
Média		0,32
VEo	0,5	0,27
	15	0,26
	30	0,19
	60	0,25
	90	0,17
Média		0,23

Observou-se que os níveis críticos nas plantas (Quadro 10) apresentaram comportamento similar ao nível crítico nos solos (Quadro 7). A maior ou menor competição entre planta e solo pelo P aplicado como fertilizante faz com que a planta se ajuste para utilizar o teor de P que lhe é colocado à disposição, levando a planta a otimizar o uso do nutriente absorvido e acumulado (MUNIZ et al., 1985; FERNÁNDEZ R., 1995; NOVAIS & SMYTH, 1999; BEDIN et al., 2003).

Assim, espera-se que o coeficiente de utilização de P seja menor em solos menos intemperizados ou arenosos e maior em solos argilosos intemperizados, que apresentam alta CMAP (FREIRE, 2001; SILVA, 2002). No NVdf, o nível crítico médio nas plantas foi $0,32 \text{ dag kg}^{-1}$ para uma produção média de 21,30 g de matéria seca (90 % da produção máxima), ao passo que no VEO o nível crítico médio foi $0,23 \text{ dag kg}^{-1}$ e a média de 90 % da produção máxima foi de 11,73 g, comprovando um coeficiente de utilização de P, 1,3 vez maior do NVdf em relação ao VEO (Quadro 11).

Os níveis críticos nas plantas em ambos os solos decresceram com o tempo de incubação (Quadro 10), no entanto, no NFdf a partir dos 30 dias, os níveis críticos começam a ser maiores e crescentes, corroborando com o comportamento apresentado pelos níveis críticos no solo (Quadro 7). Para avaliar melhor este comportamento, ajustou-se uma equação de regressão, relacionando os níveis críticos de P nas plantas em função do tempo de incubação (Figura 5). No NVdf ajustou-se um modelo curvilíneo (modelo raiz quadrada) e no VEO modelo linear decrescente.

No NVdf, calculando-se o ponto de mínimo da equação, encontrou-se que aos 19,6 dias após a incubação do solo, os níveis críticos passaram a apresentar uma tendência ascendente (Figura 5), justificada pelas elevadas e crescentes doses estimadas para 90 % da produção máxima (Figura 1), resultantes da crescente produção de matéria seca (Quadro 5), proveniente da maior disponibilidade de P no solo, devido a maior taxa de recuperação do P aplicado (Figura 3, Capítulo I), que ocorreu quando os sítios de adsorção foram supridos pelas doses de P aplicadas, como discutido anteriormente.

No VEO, os níveis críticos foram sempre decrescentes com o tempo de incubação dos solos (Figura 5), condizente com as decrescentes doses estimadas para 90 % da produção máxima de matéria seca (Figura 2) e com os níveis críticos no solo (Quadro 7). A velocidade de adsorção deste solo é pequena e, conseqüentemente, a exaustão dos poucos sítios (se houverem) é lenta. Especificamente no caso deste solo, o maior responsável pela sorção de P é o fenômeno da precipitação, principalmente na forma de fosfato de Ca, que depende das condições químicas do meio. Assim, é possível que neste solo seja necessário um maior período de tempo para que se possa atingir o patamar da adsorção e, conseqüentemente, refletir numa ascensão de níveis críticos.

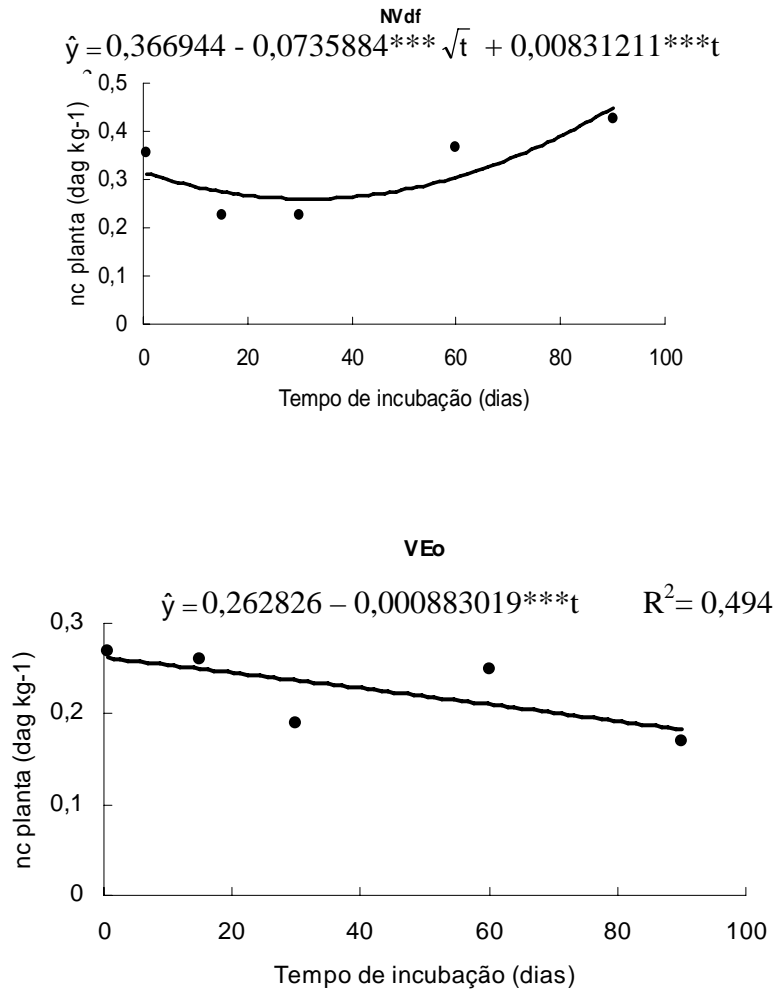


Figura 5. Níveis críticos de P nas plantas (dag kg⁻¹) no NVdf e VEo nos diferentes tempos de incubação (dias)

Quadro 11. Valor estimado de 90% da produção máxima de matéria seca, níveis críticos de fósforo na parte aérea de plantas de milho e coeficiente de utilização na utilização do P absorvido nos diferentes tempos de incubação

Solo	Tempo (dias)	Produção máxima (90%) (g/vaso)	Nível crítico na planta (dag kg ⁻¹)	Coeficiente de utilização
NVdf	0,5	13,70	0,35	39,14
	15	19,00	0,22	86,36
	30	23,40	0,23	101,74
	60	25,35	0,37	63,11
	90	25,23	0,43	58,70
	Média	21,30	0,32	69,80
VEo	0,5	13,7	0,27	50,74
	15	13,05	0,26	50,20
	30	9,80	0,19	51,60
	60	10,90	0,25	43,60
	90	11,20	0,17	66,00
	Média	11,73	0,23	52,43

Objetivando-se encontrar um extrator que melhor caracterizasse a disponibilidade de P para estes dois solos de regiões distintas do estado de Pernambuco e pelas críticas ao extrator oficial em laboratórios de rotina do Estado (Mehlich-1), por solubilizar compostos de P ligados a Ca (P-Ca), correlacionou-se o P acumulado pelas plantas (mg/vaso) com o P recuperado pelos extratores Mehlich-1, Mehlich-3, Bray-1 e CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ (Quadro 12).

Quadro 12. Coeficiente de correlação linear simples entre o P recuperado (mg dm⁻³) pelos extratores Mehlich-1, Mehlich-3, Bray-1 e CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ com o P absorvido e acumulado pelas plantas

Extratores	Conteúdo de fósforo (mg/vaso)
Mehlich-1	0,592 ^{***}
Mehlich-3	0,870 ^{***}
Bray-1	0,894 ^{***}
CaCl ₂	0,648 ^{***}

^{***}: significativo a 0,1% de probabilidade.

As correlações foram positivas e significativas para os quatro extratores, sendo o maior coeficiente obtido pelo Bray-1 e Mehlich-3, ambos correlacionando-se bem com grande parte do P absorvido e acumulado pelas plantas, provavelmente, pelo maior pH, evitando a solubilização do P-Ca (VEo), e pela presença do NH₄F atuando sobre o P ligado ao Al (P-Al) e, ou, P ligado a Fe (P-Fe) no NVdf.

Neste trabalho constatou-se a baixa eficiência do Mehlich-1, como extrator para estimar o P disponível, pelo significativo, porém baixo coeficiente de correlação com o P absorvido e

acumulado pelas plantas (Quadro 12). Apesar deste trabalho ter sido realizado com apenas dois solos, porém com características físicas e químicas extremas (Quadro 1), além da importância da localização geográfica destes, sugere-se que essa discussão seja ampliada com maiores pesquisas neste tema, para que as recomendações de adubação fosfatada em Pernambuco adequem-se às diferentes zonas produtoras do estado (zona da mata, agreste e sertão).

Correlacionando-se os extratores, constatou-se significativo e elevado coeficiente de correlação entre o Bray-1 e o Mehlich-3 (Quadro 13), o que permite recomendar um ou outro como extrator do P disponível. No entanto, pela praticidade e baixo custo do Bray-1, sugere-se a utilização deste extrator, como referencial para futuras pesquisas com extratores do P disponível em Pernambuco.

Quadro 13. Coeficiente de correlação linear simples do P recuperado (mg dm^{-3}) entre os extratores Mehlich-1, Mehlich-3, Bray-1 e CaCl_2 $0,01 \text{ mol L}^{-1}$

Extratores	Fósforo recuperado		
	Mehlich-3	Bray-1	CaCl_2 $0,01 \text{ mol L}^{-1}$
Mehlich-1	0,764***	0,694***	0,733***
Mehlich-3		0,977***	0,910***
Bray-1			0,865***

CONCLUSÕES

1. Bray-1 e Mehlich-3 foram os extratores que melhor correlacionaram com o conteúdo de P na parte aérea de plantas de milho cultivadas no Nitossolo Vermelho distroférico (NVdf) e no Vertissolo Ebânico órtico (VEo).
2. As plantas de milho demonstraram ajuste metabólico ao P disponível nos diferentes solos, sendo mais eficiente no solo de maior CMAP.
3. O solo de maior CMAP passou a apresentar caráter fonte de P em menor período de tempo, quando comparado a um de menor CMAP, pela maior velocidade da reação de adsorção de P.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As características e propriedades dos solos devem ser determinadas e interpretadas de forma a aplicar a cada solo práticas de manejo que potencializem seu uso agrícola. Nos solos tropicais, o predomínio de minerais da fração argila 1:1 (caulinita) e óxidos de Fe e Al, influenciam no fenômeno de adsorção de P, juntamente com íons em solução de Fe e Al em solos ácidos e Ca em solos naturalmente neutros ou alcalinos ou ainda naqueles recém-corrigidos pela prática da calagem, atuando em processos de precipitação de P.

Neste contexto, este trabalho contribuiu para o entendimento das relações do P nos cinco solos estudados, distintos do ponto de vista da adsorção, e da disponibilidade do nutriente para plantas neles cultivadas. Pela importante distinção entre os processos de adsorção de P com a superfície dos minerais e de precipitação, melhor caberia o termo sorção para englobar ambos os fenômenos.

Assim, pôde-se concluir que os valores do fator intensidade (I), em unidade de potencial de fosfato dos solos LAd₁, LAd₂, LVAd, NVdf, VEo, foram maiores que 7,0, compatíveis com a baixa disponibilidade natural de P dos solo; caracterizando uma baixa atividade de P em solução, e que a determinação do P rem é a análise laboratorial mais simples e que melhor estima a capacidade dos solos em manter determinada concentração de P disponível às plantas.

As características que melhor refletiram o fator capacidade de P (FCP) foram o P remanescente (P rem) e capacidade máxima de adsorção de P (CMAP). O teor de argila não foi a melhor característica para estimar a capacidade-tampão de fosfato nos solos estudados. Do mesmo modo, as características que melhor refletiram a taxa de recuperação do P aplicado foram a CMAP e P rem e FCP. O teor de argila não foi a melhor característica para estimar a taxa de recuperação do P aplicado nos solos estudados. Solos com maior CMAP, FCP e menor P rem, quando aplicadas doses baseadas em suas CMAP, apresentaram uma maior reversibilidade do P não lábil (P residual) em menor intervalo de tempo quando comparado a solos de menor CMAP, FCP e maior P rem. A concentração de 60 mg L⁻¹ de P, atualmente empregada para a determinação do P rem, parece insuficiente para uma correta caracterização de solos altamente intemperizados no que diz respeito ao seu potencial de adsorção.

Bray-1 e Mehlich-3 foram os extratores que melhor correlacionaram com o P absorvido e acumulado da parte aérea de plantas de milho cultivadas no Nitossolo Vermelho distroférico

(NVdf) e no Vertissolo Ebânico órtico (VEo). As plantas de milho demonstraram ajuste metabólico ao P disponível nos diferentes solos, sendo mais eficiente no solo de maior CMAP. O solo de maior CMAP passou a apresentar caráter fonte de P em menor período de tempo, quando comparado a um de menor CMAP, pela maior velocidade da reação de adsorção de P.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVAREZ V., V.H. et al. Determinação e uso do fósforo remanescente. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 25, p. 27-32, 2000.

ALVES, V.M.C. **Frações de fósforo, de açúcares solúveis e de nitrogênio em quatro híbridos de milho submetidos à omissão e ao ressuprimento de fósforo**. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1994. 106f. (Tese de Doutorado).

BAHIA FILHO, A.F.C. et al. Formas de fósforo inorgânico e fósforo “disponível” em um Latossolo Vermelho-Escuro, fertilizado com diferentes fosfatos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 6, p. 99-104, 1982.

BARROW, N.J. Reaction of anions and cations with variable-charge soils. **Advances in Agronomy**, v. 38, p. 183-230, 1985.

BATAGLIA, O.C. et al. **Métodos de análise química de plantas**. Campinas: Instituto Agrônômico, 1983. 48p. (Boletim técnico nº 78).

BEDIN, I. et al. Fertilizantes fosfatados e produção da soja em solos com diferentes capacidades tampão de fosfato. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 27, p. 639-646, 2003.

SILVA, E.M.B. et al. Níveis críticos de fósforo para *Brachiaria brizantha* e suas relações com características físicas e químicas em solos de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 28, p. 72-77, 2004.

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

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise do solo**. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

FAQUIN, V. et al. O potássio e o enxofre no crescimento da braquiária e do colonião em amostras de um Latossolo da região noroeste do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 19, p. 87-94, 1995.

FERNÁNDEZ R., I.E.J. Reversibilidade de fósforo não-lábil em diferentes solos, em condições naturais e quando submetidos à redução microbiológica ou química. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1995. 94f. (Tese de doutorado).

FONSECA, D.M. et al. Fatores que influenciam os níveis críticos de fósforo para o estabelecimento de gramíneas forrageiras: I. Casa de vegetação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 21, p. 27-34, 1997.

FOX, R.L.; SEARLE, P.G.E. Phosphate adsorption by soils of the tropics. In: DROSDOFF, M., Ed. **Diversity of soils in the tropics**. Madison: American Society of Agronomy, p. 97-119, 1978.

FREIRE, F.J. Sistema para cálculo do balanço nutricional e recomendação de corretivos e fertilizantes para cana-de-áçúcar. 2001. 144f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas)- Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

FRITZ, G.F. Mineral nutrition. In: NOGLE, G. & FRITZ, G.F. **Introductory Plant Physiology**. New Jersey: Prentice-Hall, 1976. p.223-271.

GONÇALVES, J.L.M. et al. Cinética de adsorção de fósforo em solos de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.9, p. 107-111, 1985.

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

HSU, P.H. Fixation of phosphate by aluminum and iron in acidic soils. **Soil Science**, Baltimore, v. 99, p. 398-402, 1965.

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

LOGANATHAN, P.; FERNANDO, W.T. Phosphorus sorption by some coconut-growing acid soils of Sri Lanka and its relationship to selected soil properties. **Journal of Science Food Agriculture**, v.31, p. 709-717, 1980.

MESQUITA FILHO, M.V.; TORRENT, J. Phosphate sorption as related to mineralogy of a hydrosequence of soils from the Cerrado region (Brazil). **Geoderma**, Amsterdam, v. 58, p. 107-123, 1993.

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa, MG: UFV, 1999.399p.

POSNER, A.M.; BOWDEN, J.W. Adsorption isotherms: should they be split? **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 31, p. 1-10, 1980.

SILVA, E.M.B. **Níveis críticos de fósforo para *Brachiaria brizantha* (Hochst ex A.Rich.) Stapf. cv. Marandu em solos de referência de Pernambuco**. 2002, 57f. Dissertação (Mestrado em Agronomia)- Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, PE.

SILVA, F.C.; RAIJ, B. Disponibilidade de fósforo em solos avaliada por diferentes extratores. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v 34, nº 2: 267-288, 1999.

SINGH, R.; MÖLLER, M.R.F.; FERREIRA, W.A. Cinética da sorção de fósforo em solos dos trópicos úmidos da Amazônia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 7, p. 227-231, 1983.

