

**DINÂMICA E DISPONIBILIDADE DE  
FÓSFORO EM SOLOS CULTIVADOS COM  
CAFEIRO EM PRODUÇÃO**

**THIAGO HENRIQUE PEREIRA REIS**

**2009**

**THIAGO HENRIQUE PEREIRA REIS**

**DINÂMICA E DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO EM SOLOS  
CULTIVADOS COM CAFEIEIRO EM PRODUÇÃO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, para a obtenção do título de “Mestre”.

Orientador

Prof. Dr. Antônio Eduardo Furtini Neto

LAVRAS  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2009

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da  
Biblioteca Central da UFLA**

Reis, Thiago Henrique Pereira.

Dinâmica e disponibilidade de fósforo em solos cultivados  
com cafeeiro em produção / Thiago Henrique Pereira Reis. –  
Lavras : UFLA, 2009.

114 p.: il.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2009.

Orientador: Antônio Eduardo Furtini Neto.

Bibliografia.

1. Fertilidade do solo . 2. Fracionamento de Fósforo . 3. Cafeeiro  
em produção. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 633.73895

**THIAGO HENRIQUE PEREIRA REIS**

**DINÂMICA E DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO EM SOLOS  
CULTIVADOS COM CAFEIEIRO EM PRODUÇÃO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, para a obtenção do título de “Mestre”.

APROVADA em 19 de fevereiro de 2009

Dr. Antônio Fernando Guerra

Embrapa Cerrados

Dr. Paulo Tácito Gontijo Guimarães

Epamig

Prof. Dr. Nilton Curi

UFLA

Prof. Dr. Antônio Eduardo Furtini Neto

UFLA

(Orientador)

LAVRAS  
MINAS GERAIS – BRASIL

A todos para quem este trabalho de pesquisa possa ser útil,

***OFEREÇO***

Aos meus pais, irmãos e sobrinhos  
pela motivação e confiança depositada.

A Rosana, pelo companheirismo, paciência e  
pelo amor sincero e verdadeiro.

***DEDICO***

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, por ter me concedido muita saúde e força nesta caminhada, sempre iluminando minha direção para que eu pudesse atingir meus objetivos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Dr. Gabriel Ferreira Bartholo, então gerente geral do Consórcio Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento do Café – CBP&D-Café, pelo apoio.

Ao professor Dr. Antônio Eduardo Furtini Neto, pela oportunidade concedida e pela orientação no decorrer deste trabalho.

Ao pesquisador Dr. Paulo Tácito Gontijo Guimarães, pela amizade, orientação e ensinamentos, uma vez que não mediu esforços para contribuir para a minha vida profissional e também pessoal.

Aos professores Dr. Nilton Curi e Dr. João José Marques, pelo auxílio e sugestões ao trabalho.

Aos demais professores do Departamento de Ciência do Solo, que dedicaram parte de seu tempo contribuindo para minha formação.

Aos pesquisadores da Embrapa Cerrados, Dr. Antônio Fernando Guerra e Dr. Omar Cruz Rocha, pela contribuição no desenvolvimento do trabalho e cessão dos dados do experimento; em particular, ao Sr. Amilton, chefe da equipe técnica de campo, que muito contribuiu para a otimização de nosso trabalho.

Aos senhores proprietários e funcionários das Fazendas Canta Galo, Passeio, Santo Antônio, Mimoso e Lagoa d'Oeste, que acreditaram

em nosso trabalho, sempre facilitando nossas atividades de campo, principalmente o engenheiro agrônomo Guy Carvalho Ribeiro Filho.

Aos colegas Lauro e André, pelo auxílio nas coletas de material de campo.

Aos colegas José Zilton, pela transmissão de experiências nas análises laboratoriais e Leandro, pela indispensável ajuda e convivência no laboratório.

Aos alunos de iniciação científica Marcos, Lucas e Bruno, pela ajuda nas análises laboratoriais.

A todos os servidores e técnicos do DCS, principalmente o Sr. Roberto Lelis Mesquita, sempre prestativo e pela convivência no laboratório.

Aos colegas de pós-graduação, pelo convívio, ajuda e troca de experiências por muitos momentos.

Aos amigos e companheiros de república, André, Guilherme e Paulo, pelo respeito, paciência, compreensão e convivência durante esta etapa de minha vida.

***Muito Obrigado***

## SUMÁRIO

	<b>Página</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	i
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	iii
<b>RESUMO GERAL</b> .....	vii
<b>GENERAL ABSTRACT</b> .....	ix
<b>CAPÍTULO I</b> .....	1
1 Introdução geral .....	2
2 Referencial teórico .....	5
2.1 Importância do fósforo .....	5
2.2 Dinâmica e disponibilidade de fósforo no solo .....	6
2.3 Fracionamento de fósforo no solo .....	9
2.4 Fósforo no cafeeiro .....	14
3 Referências bibliográficas .....	19
<b>CAPÍTULO II – Dinâmica e disponibilidade de fósforo no solo para o cafeeiro</b> .....	27
1 Resumo .....	28
2 Abstract .....	30
3 Introdução .....	31
4 Material e métodos .....	33
4.1 Experimentos .....	33
4.1.1 Experimento I .....	34
4.1.2 Experimento II .....	36
4.2 Análises laboratoriais .....	37
4.3 Análises estatísticas .....	40



5 Resultados e discussão .....	41
5.1 Experimento I .....	43
5.1.1 Produção e teores foliares .....	43
5.1.2 Fracionamento de P no solo .....	47
5.1.2.1 Fósforo disponível .....	48
5.1.2.2 Fósforo moderadamente lábil .....	56
5.1.2.3 Fósforo pouco lábil .....	58
5.1.2.4 Fósforo biodisponível e fósforo total recuperado .....	61
5.2 Experimento II .....	65
6 Conclusões .....	73
7 Referências bibliográficas .....	74
<b>CAPÍTULO III – Dinâmica e disponibilidade de fósforo no solo sob cafeeiro: doses de P, mineralogia e frações inorgânicas de P</b>	81
1 Resumo .....	82
2 Abstract .....	84
3 Introdução .....	85
4 Material e métodos .....	87
4.1 Experimentos .....	87
4.1.1 Experimento I .....	87
4.1.2 Experimento II .....	89
4.2 Análises laboratoriais .....	90
4.3 Análises estatísticas .....	93
5 Resultados e discussão .....	93
5.1 Mineralogia dos solos .....	93
5.2 Experimento I .....	96

5.2.1 Formas de P no solo .....	96
5.3 Experimento II .....	107
6 Conclusões .....	113
7 Referências bibliográficas .....	113

## LISTA DE TABELAS

### CAPÍTULO II

<b>Tabela</b>		<b>Página</b>
<b>1</b>	Atributos químicos, físicos e mineralógicos* originais dos solos, LVd de Planaltina, DF, e PVd de Cabo Verde-MG nas profundidades 0 a 10, 10 a 20 e 20 a 40cm por ocasião do início do estudo, em julho de 2007 .....	38
<b>2</b>	Atributos químicos de um Latossolo Vermelho distrófico típico (LVd) de Planaltina, DF, submetido a diferentes doses de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> em três profundidades em amostras coletadas em 2008 .....	42
<b>3</b>	Atributos químicos de um Argissolo Vermelho distrófico típico (PVd) de Cabo Verde, MG em três profundidades de amostras coletadas em 2008 em área adubada com P na quantidade convencional e com 300 kg ha <sup>-1</sup> de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> .....	43
<b>4</b>	Médias de produtividade de cafeeiros irrigados, após seis anos de produção, em função de doses de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , num Latossolo Vermelho distrófico típico (LVd) em Planaltina, DF, .....	45
<b>5</b>	Frações de fósforo em um Latossolo Vermelho distrófico típico (LVd) de Planaltina, DF, cultivado com cafeeiros submetidos a diferentes doses anuais de P no ano 2007 .....	53
<b>6</b>	Frações de fósforo em um Latossolo Vermelho distrófico típico (LVd) de Planaltina, DF, cultivado com cafeeiros submetidos a diferentes doses anuais de P no ano 2008 .....	54
<b>7</b>	Teores de fósforo lábil, moderadamente-lábil, pouco lábil, P-Σ (Hedley) e P total recuperado (Bowman,	

	1989) em três profundidades num Argissolo Vermelho distrófico (LVd) típico de Cabo Verde, MG em função da aplicação de fósforo .....	67
8	Frações de fósforo em um Argissolo Vermelho distrófico típico (LVd) de Cabo Verde, MG cultivado com cafeeiros submetidos a doses de P em áreas com adubação convencional, 300 kg ha <sup>-1</sup> de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> e área adjacente, no ano 2007 .....	70
9	Frações de fósforo em um Argissolo Vermelho distrófico típico (LVd) de Cabo Verde, MG cultivado com cafeeiros submetidos a doses de P em áreas com adubação convencional, 300 kg ha <sup>-1</sup> de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , ano 2008 .....	71

### CAPÍTULO III

Tabela		Página
1	Atributos químicos, físicos e mineralógicos* originais dos solos, LVd de Planaltina, DF, e PVd de Cabo Verde-MG nas profundidades 0 a 10, 10 a 20 e 20 a 40cm por ocasião do início do estudo, em julho de 2007 .....	91
2	Teores de P-Al, P-Fe e P-Ca determinados em amostras de um Latossolo Vermelho distrófico típico (LVd) de Planaltina, DF, submetido a doses de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> por vários anos, em dois anos de estudo, 2007 e 2008..	99
3	Coefficientes de correlação linear simples entre os extratores Mehlich-1 e resina de troca iônica e as formas relativas de P-Al, P-Fe e P-Ca, em dois anos de estudo, 2007 e 2008, onde utilizou-se doses de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> por vários anos, em um LVd de Planaltina, DF .....	107
4	Teores relativos de fósforo inorgânico no solo, ligado a Ca, Fe e Al, em três profundidades em um PVd de Cabo Verde, MG, em função da aplicação de doses de fósforo, em dois anos de estudo, 2007 e 2008 .....	108

5	Teores de P-Al, P-Fe e P-Ca determinados em amostras de um Argissolo Vermelho distrófico típico (PVd) de Cabo Verde, MG em áreas de adubação convencional, adubação com 300 kg ha <sup>-1</sup> de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> e área adjacente, 2007 e 2008 .....	111
---	--	-----

## LISTA DE FIGURAS

### CAPÍTULO II

Figura		Página
1	Fluxograma operacional de algumas frações de fósforo conforme Hedley et al. (1982) .....	40
2	Produção (A) e teores foliares (B) de cafeeiros irrigados submetidos a diferentes doses anuais de fósforo em um LVd de Planaltina, DF (safra de 2008)	44
3	Teores de fósforo disponível pelo extrator de Mehlich-1 no solo, em diferentes profundidades num LVd de Planaltina, DF, em função da aplicação anual de doses de fósforo em amostras coletadas em dois anos (A e B = camadas de 0 a 10 e 10 a 20cm, respectivamente, no ano de 2007; C e D = camadas de 0 a 10 e 10 a 20cm, respectivamente, no ano de 2008) .....	50
4	Teores de fósforo disponível pela resina de troca iônica, em diferentes profundidades num LVd de Planaltina, DF, em função da aplicação anual de doses de fósforo em amostras coletadas em dois anos (A e B = camadas 0 a 10 e 10 a 20cm respectivamente, no ano 2007; C, D e E = camadas 0 a 10, 10 a 20 e 20 a 40cm respectivamente, no ano 2008) .....	51
5	Teores de fósforo lábil no solo, disponível pelo extrator NaHCO <sub>3</sub> 0,5 mol L <sup>-1</sup> , em diferentes profundidades num LVd de Planaltina, DF, em função	

	da aplicação anual de doses de fósforo em amostras coletadas em dois anos (A, B e C = camadas 0 a 10, 10 a 20 e 20 a 40cm respectivamente, no ano 2007; D, E e F = camadas 0 a 10, 10 a 20 e 20 a 40cm respectivamente, no ano 2008) .....	52
<b>6</b>	Teores de fósforo moderadamente lábil no solo, disponível pelo extrator NaOH 0,1 mol L <sup>-1</sup> , em diferentes profundidades num LVd de Planaltina, DF, em função da aplicação anual de doses de fósforo em amostras coletadas em dois anos (A e B = camadas 0 a 10 e 10 a 20cm respectivamente, no ano 2007; C e D = camadas 0 a 10 e 10 a 20cm respectivamente, no ano 2008) .....	57
<b>7</b>	Teores de fósforo pouco lábil no solo, disponível pelo extrator NaOH 0,5 mol L <sup>-1</sup> , em diferentes profundidades num LVd de Planaltina, DF, em função da aplicação anual de doses de fósforo em amostras coletadas em dois anos (A = camada 0-10cm, no ano 2007; B e C = camadas 0 a 10cm e 10 a 20cm respectivamente, no ano 2008) .....	59
<b>8</b>	Teores de fósforo biodisponível no solo, em diferentes profundidades num LVd de Planaltina, DF, em função da aplicação anual de doses de fósforo em amostras coletadas em dois anos (A, B e C = camadas 0 a 10, 10 a 20 e 20 a 40cm respectivamente, no ano 2007; D, E e F = camadas 0 a 10, 10 a 20 e 20 a 40cm respectivamente, no ano 2008) .....	62
<b>9</b>	Teores de fósforo total recuperados no solo (Bowman, 1989), em diferentes profundidades num LVd de Planaltina, DF, em função da aplicação anual de doses de fósforo em amostras coletadas em dois anos (A, B e C = camadas 0 a 10, 10 a 20 e 20 a 40cm respectivamente, no ano 2007; D, E e F = camadas 0 a 10, 10 a 20 e 20 a 40cm respectivamente, no ano 2008) .....	64

### CAPÍTULO III

<b>Figura</b>		<b>Página</b>
<b>1</b>	Difratogramas de raios-X da fração argila saturada com Na <sup>+</sup> da camada de 0 a 40cm do Latossolo Vermelho distrófico típico (LVd) de Planaltina, DF. Ct: caulinita; Gb: gibbsita; Gt: goethita; Qz: quartzo. Números representam espaçamento d em nm .....	94
<b>2</b>	Difratogramas de raios-X da fração argila saturada com Na <sup>+</sup> da camada de 0 a 40cm do Argissolo Vermelho distrófico típico (PVd) de Cabo Verde, MG. Ct: caulinita; Gb: gibbsita; Gt: goethita; Qz: quartzo. Números representam espaçamento d em nm .....	95
<b>3</b>	Teores de fósforo disponível pelo extrator de Mehlich-1 no solo, em diferentes profundidades num LVd de Planaltina, DF, em função da aplicação anual de doses de fósforo em amostras coletadas em dois anos (A e B = camadas de 0 a 10 e 10 a 20cm, respectivamente, no ano de 2007; C e D = camadas de 0 a 10 e 10 a 20cm, respectivamente, no ano de 2008) .....	96
<b>4</b>	Teores de fósforo disponível pela resina de troca iônica, em diferentes profundidades num LVd de Planaltina, DF, em função da aplicação anual de doses de fósforo em amostras coletadas em dois anos (A e B = camadas 0 a 10 e 10 a 20cm respectivamente, no ano 2007; C, D e E = camadas 0 a 10, 10 a 20 e 20 a 40cm respectivamente, no ano 2008) .....	97
<b>5</b>	Teores de P ligado a Ca, Fe e Al relativos ao P inorgânico total do solo – $\Sigma$ (P-Ca + P-Fe + P-Al), em diferentes profundidades num LVd de Planaltina, DF, em função da aplicação de doses anuais de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> em amostras coletadas em dois anos (A, B e C = camadas 0 a 10, 10 a 20 e 20 a 40cm respectivamente, no ano 2007; D, E e F = camadas 0 a 10, 10 a 20 e 20 a 40cm respectivamente, no ano 2008) .....	100

6	Equilíbrio termodinâmico simulado entre as possíveis espécies minerais formadas no solo em função da aplicação de fósforo como superfosfato triplo .....	104
---	--	-----



## RESUMO GERAL

REIS, Thiago Henrique Pereira. **Dinâmica e disponibilidade de fósforo em solos cultivados com cafeeiro em produção**. 2009. 114p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.<sup>1</sup>

Por muitos anos, o cafeeiro foi considerado uma planta pouco responsiva à adubação fosfatada. Entretanto, resultados recentes de pesquisa mostraram que esta cultura demanda maior quantidade de fósforo para desenvolver plenamente seu sistema vegetativo e reprodutivo. No intuito de compreender como a disponibilidade de fósforo é influenciada pela adição anual de doses de P no solo e como isso pode implicar no manejo de adubações fosfatadas futuras para o cafeeiro, este trabalho foi realizado com os seguintes objetivos: (a) quantificar as frações de P lábeis, moderadamente lábeis, pouco lábeis e total, associando-as às respostas em produção do cafeeiro (b) quantificar as frações inorgânicas ligadas a Ca, Fe e Al, associando-as à mineralogia do solo. Para tanto, foram analisados dois experimentos em áreas com cafeeiros em produção: (I) num Latossolo Vermelho distrófico típico (LVd), área irrigada localizada em Planaltina, DF, submetida à adubação fosfatada anual de 0, 50, 100, 200 e 400 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, como superfosfato triplo, com três repetições em blocos casualizados; (II) num Argissolo Vermelho distrófico típico (PVd), área de sequeiro localizada em Cabo Verde, Sul de Minas Gerais, em dois talhões: um que recebeu a dose de 300 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, sendo 2/3 como superfosfato simples e 1/3 como termofosfato magnésiano e outro no qual não se utilizou adubo fosfatado nos anos agrícolas avaliados, sendo as amostras retiradas em blocos casualizados com quatro repetições. Foram determinadas frações de fósforo nas amostras de solo coletadas nas profundidades 0 a 10, 10 a 20 e 20 a 40cm, conforme as metodologias de Chang & Jackson (1957), Hedley et al. (1982) e Bowman (1989). Observou-se que o cafeeiro irrigado mostrou-se responsivo à adubação fosfatada em fase de produção

---

<sup>1</sup> Comitê orientador: Antônio Eduardo Furtini Neto – UFLA (orientador); Paulo Tácito Gontijo Guimarães – EPAMIG (Coorientador); Nilton Curi – UFLA; Antônio Fernando Guerra – Embrapa Cerrados.

da cultura, obtendo-se ganhos de até 138% de produtividade com a aplicação da maior dose de 400 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> na safra avaliada. Os teores foliares de P do cafeeiro aumentaram com a aplicação de doses de P no solo e se estabilizaram em torno de 1,9 a 2,0 g kg<sup>-1</sup>. A adição de fósforo ao solo afetou de maneira variável a distribuição das frações de P nas três profundidades avaliadas, promovendo incrementos na maioria das frações de P estudadas. O compartimento de P-biodisponível apresentou-se como maior reservatório de P do solo, embora o P-residual estimado tenha apresentado valores bastante expressivos na camada de 0 a 10cm. O P aplicado ao solo encontra-se principalmente ligado ao Al e esta é a forma de fósforo no solo que está predominantemente fornecendo o nutriente ao cafeeiro. As frações de P neste trabalho apresentaram a seguinte magnitude: P-Al>P-Fe>P-Ca.

## GENERAL ABSTRACT

REIS, Thiago Henrique Pereira. **Phosphorus dynamics and availability in soils cultivated with production coffee plants.** 2009. 114p. Dissertation (Master in Soil Science) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.<sup>2</sup>

During many years coffee (*Coffea arabica* L.) plants have been considered low responsive to phosphorus fertilization. However, recent research data show that these plants demand high phosphorus quantity to fully develop their vegetative and reproductive systems. Aiming to know how phosphorus availability is influenced by annual P doses and how they may influence the future phosphorus fertilization management, this work was developed with the following objectives: (a) to quantify the labile, moderate-labile, low-labile and total P fractions associating them to coffee yield; (b) to quantify inorganic calcium, iron and aluminum P fractions associating them to soil mineralogy. For this purpose two experiments were analyzed in two coffee production areas: (1) in a typical dystrophic Red Latosol (Oxisol) located in an irrigated area - Planaltina, DF, with triple superphosphate annual fertilization of 0, 50, 100, 200 and 400 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> in randomized blocks with three replications; (2) in a typical dystrophic Red Argisol (Ultisol) located in an area without irrigation - Cabo Verde - south of Minas Gerais, in two production areas: one receiving 300 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, being 2/3 applied as simple superphosphate and 1/3 as magnesium thermophosphate, and another with no P fertilization in the evaluated agricultural years, in randomized blocks with four replicates. Phosphorus fractions were determined in soil samples collected at three depths: 0-10, 10-20 and 20-40cm, according to Chang & Jackson (1957), Hedley et al. (1982) and Bowman (1989) methodologies. It was observed that the irrigated coffee plant responded to phosphorus fertilization, obtaining gains up to 138% of productivity with the application of 400 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> dosis. The leaves P content increased with soil P application doses and stabilized around 1.9 to 2.0 g

---

<sup>2</sup> Guidance Committee: Antônio Eduardo Furtini Neto – UFLA (Adviser); Paulo Tácito Gontijo Guimarães – EPAMIG (Co-Adviser); Nilton Curi – UFLA; Antônio Fernando Guerra – Embrapa Cerrados.

kg<sup>-1</sup>. The soil P addition influenced the P fractions at all three depths studied. The bio-available P compartment showed to be highest soil P reservoir, although the estimated residual P showed substantial values at the 0-10cm depth. The P applied in the soil remains mainly linked to Al which is the main P form furnishing the nutrient to coffee plants. The inorganic P fractions presented the following sequence: P-Al > P-Fe > P-Ca.

## **CAPÍTULO I**

## 1 INTRODUÇÃO GERAL

A fertilidade do solo está estreitamente relacionada com a produtividade das plantas, se mantidos os demais fatores de produção em níveis não limitantes. Para o fósforo (P), este comportamento não é exceção. Este nutriente é, talvez, o mais investigado na literatura, em função de sua importância para os seres vivos, da frequência com que limita a produção das culturas, sobretudo nas regiões tropicais e pelo fato de ser um insumo mineral finito e insubstituível (Malavolta, 2006).

O P é imprescindível ao crescimento e à reprodução das plantas (Marschner, 1995) com principal função de armazenamento e transporte de energia na forma de ATP (Malavolta, 2006). O nutriente tem uma dinâmica complexa em solos das regiões tropicais que apresentam em geral teores de P disponível limitantes ao desenvolvimento normal das culturas (Lopes, 1983). Nestes solos, são grandes as quantidades de P a serem aplicadas para manter a disponibilidade adequada do nutriente para as plantas (Souza et al., 2004).

Por muitos anos, o cafeeiro foi considerado como uma planta que não responde à aplicação de altas doses de P no solo (Bataglia, 2004). A pesquisa, provavelmente, chegou a esta conclusão, pois o P é um dos macronutrientes menos exportados pelo cafeeiro (Malavolta, 1986) e, sendo assim, a planta não precisaria de grande quantidade do nutriente para completar seu ciclo reprodutivo. Além disso, anteriormente o cafeeiro só era cultivado em solos de média a alta fertilidade e a maioria das fazendas experimentais nas diferentes regiões do mundo estava em localidades nestas condições, logo, esta planta era considerada como não

responsiva ao nutriente. Entretanto, alguns trabalhos têm mostrado que o cafeeiro consegue responder a incrementos de P, principalmente nos solos de baixa fertilidade como os de Cerrado, na fase de implantação da cultura e em anos de alta produtividade (Guimarães, 1986; Gallo et al., 1999; Prezzotti & Rocha, 2004).

Altas produtividades médias e constantes em cafeeiros irrigados num Latossolo originalmente sob cerrado foram obtidas em Planaltina, DF, mostrando respostas muito promissoras quando se aplicaram-se doses de até 400 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, até então pouco testadas para a cultura (Guerra et al., 2007). Estes autores afirmam que a adubação fosfatada do cafeeiro deve ser feita anualmente, parcelada nos períodos de maior demanda da planta, considerando que a mesma precisa de P como suprimento energético para crescer e desenvolver plenamente seus ramos plagiotrópicos e gemas reprodutivas, independentemente da produtividade esperada para o ano seguinte.

Dessa maneira, aliados ao estresse hídrico controlado (Guerra et al., 2006), conseguiram-se produtividades médias em torno de 70 sacas de café beneficiado ha<sup>-1</sup>, minimização da bienalidade da cultura, alto grau de uniformidade de maturação dos frutos na colheita com baixa incidência de grãos defeituosos e plantas mais vigorosas, mesmo após alta produção (Guerra et al., 2007). Neste contexto, há a necessidade de compreender como o P está se comportando no ambiente solo-planta neste sistema com grandes incrementos anuais de fosfato, haja vista as características dos solos brasileiros que, em sua maioria, competem com as plantas pelo nutriente. Nesta situação, são feitas indagações sobre se realmente é necessário aplicar maiores doses de P todos os anos ou se, por meio de

alguma alteração de manejo do solo, as doses não poderiam ser menores. Também se questiona se essa aplicação é viável do ponto de vista técnico, econômico e ecológico, uma vez que o P é um nutriente considerado caro e com reservas minerais finitas.

Buscando compreender como a disponibilidade de fósforo é influenciada pela adição de doses de P e como isso pode implicar no manejo de adubações fosfatadas futuras, este trabalho foi realizado com os objetivos de: (a) quantificar as frações lábeis, moderadamente lábeis, pouco lábeis e totais, associando-as às produtividades do cafeeiro, em dois solos/locais em função da aplicação de doses anuais de P e (b) quantificar as formas inorgânicas de fósforo ligadas a Ca, Fe e Al associando-as às frações de fósforo e à mineralogia do solo em dois solos/locais em função da aplicação de doses anuais de P.



## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Importância do fósforo**

A fertilidade do solo está estreitamente relacionada com a produtividade das plantas, se mantidos os demais fatores de produção em níveis não limitantes. Para o fósforo (P), este comportamento não é exceção. Este nutriente é, talvez, o mais investigado na literatura, em função de sua importância para os seres vivos, da frequência com que limita a produção das culturas, sobretudo nas regiões tropicais e pelo fato de ser um insumo mineral finito e insubstituível (Malavolta, 2006).

O P é imprescindível ao crescimento e à reprodução das plantas, as quais não alcançam seu máximo potencial produtivo sem um adequado suprimento nutricional (Marschner, 1995). Ele é constituinte de importantes compostos das células vegetais, incluindo fosfato presente nas moléculas de açúcares intermediários da respiração e fotossíntese, bem como dos fosfolipídeos que compõem as membranas vegetais. É, também, componente de nucleotídeos utilizados no metabolismo energético das plantas (Taiz & Zeinger, 2004). Enfim, seu principal papel na planta é o de armazenar e transferir energia (Malavolta, 2006).

O comportamento do P torna-se ainda mais importante em solos das regiões tropicais sob cerrado que apresentam teores de P disponível muito abaixo dos níveis críticos utilizados para interpretação de análise de P, limitando o desenvolvimento normal das culturas (Lopes, 1983). Nestes solos, são grandes as quantidades de P a serem aplicadas para manter a disponibilidade adequada do nutriente para as plantas (Sousa et al., 2004).

## **2.2 Dinâmica e disponibilidade de fósforo no solo**

O solo é heterogêneo e nele ocorrem reações complexas, envolvendo os nutrientes adicionados pelos adubos que, muitas vezes, embora presentes em quantidades adequadas, não estão disponíveis para a absorção pelas raízes (Martinez et al., 1999).

Em decorrência das reações de equilíbrio nos solos ácidos, o P predomina na solução do solo como íons ortofosfato ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ). Na fase sólida do solo ele combina, principalmente, com metais, como o ferro e o alumínio, e com o cálcio, ocorrendo também na matéria orgânica (Raij et al., 2001). Por outro lado, existe o fato de os solos brasileiros serem ricos em óxidos hidratados de ferro e alumínio que, juntamente com a caulinita, constituem a maior parte da composição mineralógica da fração argila do solo, a parte mais ativa na qual ocorrem as reações do fósforo com estes compostos (Raij, 2004).

Em se tratando de solos de regiões tropicais, especialmente nos cerrados, onde a disponibilidade do nutriente é muito baixa em condições naturais de intenso intemperismo, há a necessidade de maior atenção quanto a este nutriente em relação aos demais, para que se permita alcançar uma produção agrícola economicamente rentável (Sousa et al., 2004). Frequentemente, mais de 90% do P aplicado no solo é adsorvido na primeira hora de contato com o mesmo, formando, primeiramente, o P-lábil e, posteriormente, com o passar do tempo, o P não-lábil (Novais et al., 2007). Segundo Moreira & Siqueira (2006), mais de 75% do P aplicado ao solo é perdido, permanecendo retido em suas partículas. Isso faz com que sejam altas as quantidades de P a serem aplicadas

nesses solos para atender à demanda adequada do nutriente às plantas cultivadas (Sousa et al., 2004).

Em relação ao ponto de equilíbrio, a fração inorgânica de P no solo encontra-se dividida em fase líquida ou solução do solo e fase sólida. Na fase líquida, o P ocorre em teores muito baixos, com valores da ordem de  $0,1 \text{ mg kg}^{-1}$  e, dessa forma, o P solúvel na camada arável do solo seria insuficiente para suprir a necessidade das culturas (Raij, 1991). O fósforo, na fase sólida, encontra-se, na maior parte, combinado a compostos de ferro, alumínio e cálcio e na matéria orgânica. Este P na fase sólida é conceitualmente dividido em P-lábil e P-não lábil, sendo a fração mais disponível para as plantas considerada lábil, enquanto a fração que está fortemente adsorvida ou precipitada em compostos insolúveis é considerada não lábil (Sá, 2004). Nos Latossolos, predominam as formas inorgânicas ligadas à fração mineral com alta energia e as formas inorgânicas estabilizadas física e quimicamente (Rheinheimer et al., 2008).

A dinâmica do fósforo no solo está associada a fatores ambientais que controlam a atividade dos microrganismos, os quais imobilizam ou liberam os íons ortofosfato, e às propriedades físico-químicas e mineralógicas do solo (Rheinheimer et al., 2008). Desse modo, as reações do P devem ser observadas no âmbito do sistema solo-planta, uma vez que a planta absorve P da solução do solo e a fase sólida passa a ser fonte potencial desse nutriente (Novais et al., 2007).

Dentre esses fatores, há aqueles ligados diretamente ao solo, como o pH, que, de forma geral, afeta a solubilidade dos minerais, as formas dominantes dos íons em solução, as reações de adsorção-dessorção e a

atividade microbiana, que é responsável pela decomposição dos compostos orgânicos (Anghinoni, 2004; Sato & Comerford, 2005). Outro atributo bastante importante para os solos tropicais é o conteúdo de alumínio trocável, em que a correção da acidez do solo irá provocar a redução de sua atividade, levando à menor fixação ou à precipitação de P por este metal e, assim, promovendo maior eficiência do P aplicado na forma de fertilizante. Por outro lado, os fatores físicos apresentam importante papel na disponibilidade do P, pois, de modo geral, solos que apresentam maiores teores de argila mostram maior potencial de fixação deste elemento e, conseqüentemente, a diminuição da sua disponibilidade para as plantas, principalmente quando essa argila é rica em óxidos de ferro e alumínio (Novais & Smith, 1999).

Em solos deficientes em P e com grande quantidade de argilominerais e óxidos, a adsorção de P é maior e, para o atendimento da exigência das culturas, são necessários níveis de adubação fosfatada mais elevados do que em solos arenosos (Motta et al., 2002). Outro importante componente do solo, que afeta a disponibilidade de P para as plantas, é a matéria orgânica, sendo o seu efeito, principalmente, devido à maior dificuldade de contato dos íons ortofosfato com os sítios de fixação. Esse processo acontece pelo recobrimento desses sítios por radicais orgânicos, formação de complexos organofosforados, os quais são mais facilmente absorvidos pelas plantas e substituição de íons fosfatos por íons orgânicos nos sítios de adsorção (Sá, 2004).

A eficiência agrônômica das fontes também interfere no fornecimento de P às plantas e essa interferência está relacionada à composição química, à granulometria e à solubilidade da mesma, de

modo que quanto maior a solubilidade da fonte, mais rápida deve ser a influência da difusão do P no processo de absorção pelas plantas, como também a adsorção pelas partículas do solo (Souza et al., 2004; Prochnow et al., 2004).

### **2.3 Fracionamento de fósforo no solo**

Existem vários métodos para caracterizar as formas de P no solo. Um dos mais conhecidos é o de Chang & Jackson (1957), que permite a caracterização, mediante extrações sucessivas, das diversas formas inorgânicas de P, como fósforo facilmente solúvel (P-H<sub>2</sub>O), fósforo ligado a alumínio (P-Al), fósforo ligado a ferro (P-Fe) e fósforo ligado a cálcio (P-Ca). Este método que, por sua simplicidade, possibilita revelar a causa da deficiência deste nutriente e prever a resposta das culturas à adubação fosfatada, tem sido muito utilizado nos estudos sobre o comportamento químico do P nos solos (Barbosa Filho et al., 1987). Entretanto, a distribuição das formas inorgânicas de P varia de acordo com a mineralogia do solo (Rheinheimer & Anghinoni, 2001) e, além dos fosfatos inorgânicos, o solo contém fosfatos orgânicos, que podem representar parte considerável do P total (Raij, 2004).

Em solos mais intemperizados, como os de cerrado, em geral, observa-se a predominância de P-Fe e de P-Al sobre P-Ca. Avaliando as formas de P mais lábil em solos da Carolina do Norte (EUA), Novais & Kamprath (1978), verificaram que a maior liberação de P é proporcionada por P-Al, seguida de longe pelo P-Fe e, finalmente, pelo P-Ca. No entanto, em função da variação do tipo de solo, qualquer uma dessas formas de P pode ser importante (Novais & Smyth, 1999). Estudando

diferentes tipos de Latossolos, Motta et al. (2002) observaram que à medida que esses solos foram sendo cultivados e concomitantemente adubados, ocorreram aumentos predominantes das frações P-Fe e P-Al. Em outro estudo, após 23 anos de cultivo e adubação de um Andossolo, Takahashi & Anwar (2007) mostraram que todas as três frações de P aumentaram após o cultivo de trigo. Entretanto, o P-Al foi a fração que teve o aumento mais expressivo seguida por P-Fe, e os autores concluíram que o trigo pode absorver o nutriente do solo proveniente de qualquer uma dessas duas formas de P.

Outro método utilizado para a caracterização das diferentes frações de P no solo é o de Hedley et al. (1982), que se baseia na extração sequencial de formas lábeis, pouco lábeis e não lábeis, por meio da qual formas inorgânicas e orgânicas são separadas conforme sua disponibilidade às plantas. Sua vantagem é a obtenção de informações sobre a disponibilidade de P a curto e longo prazos, por meio da avaliação dos diferentes compartimentos com distintos graus de disponibilidade para as plantas (Silva et al., 2003), podendo também ser empregado para acompanhar modificações nas formas de P, em decorrência de processos no solo (Araújo & Salcedo, 1997).

De acordo com o método de Hedley et al. (1982), para os solos tropicais, as maiores proporções de P têm sido encontradas nas extrações com NaOH, provavelmente, devido à forte relação desta fração com óxidos de ferro e alumínio, caulinita e matéria orgânica (Araújo & Salcedo, 1997; Rheinheimer & Anghinoni, 2001; Conte et al., 2003). Este compartimento é considerado como pouco lábil para a planta (Hedley et al., 1982). No entanto, alguns autores (Rheinheimer et al., 2000)

observaram que essas formas de P são dinâmicas e participam no aporte do nutriente às culturas.

O fósforo total (Pt) dos solos é composto de diferentes frações orgânicas (Po) e inorgânicas (Pi) de P que apresentam diferentes graus de disponibilidade para as plantas (Hedley et al., 1982; Bowman, 1989). Em relação às formas de Pi, alguns trabalhos indicam que a metade delas é constituída de P-residual, um quarto são formas pouco lábeis e o restante são formas inorgânicas de P ligado a cálcio e aquelas extraídas pela resina de troca aniônica e pela solução de  $\text{NaHCO}_3$ , sendo apenas estas últimas formas inorgânicas de P prontamente disponíveis para as plantas. Resultados experimentais mostram a participação de poucas formas de Pi no suprimento de P às plantas e que as formas de Po, uma vez mineralizadas, poderão atender boa parte da demanda de P às plantas, especialmente em condições de pouca ou nenhuma adição de fertilizante fosfatado, pelo menos nos primeiros cultivos (Oliveira et al., 2002).

Segundo Novais & Smyth (1999), em condições de cultivo sem o suprimento de fertilizantes fosfatados, o Po expressa seu caráter-fonte, enquanto em solos originalmente pobres em P, mas que depois foram fertilizados com Pi, o Po expressa seu caráter-dreno, uma vez que, nessas condições, os processos de imobilização de Pi superam os de mineralização de Po. Entretanto, a lenta mineralização da fase orgânica é garantia de suprimento mais gradual de P e de outros nutrientes para o crescimento de plantas, como o eucalipto, o cafeeiro e pastos, dentre outras, nessas condições.

Corroborando com estas observações, em um estudo de Po em solos sob coberturas florestais e pastagem, Cunha et al. (2007) concluíram

que, sob as coberturas florestais, houve um maior teor de Po total e Po lábil que correlacionaram-se positivamente com o C orgânico do solo, tendo o Po lábil predominado sobre o Pi lábil e também correlacionou-se com o P disponível por Mehlich-1.

A interpretação do fracionamento sequencial é baseada no entendimento das ações dos extratores individuais, sua sequência e sua relação com as propriedades químicas e biológicas do solo, sendo, portanto uma tentativa de separar formas de P de acordo com sua labilidade e aproximando-se das funções biológicas das plantas. Entretanto, apesar de suas limitações, os métodos de fracionamento que utilizam extrações alcalinas e ácidas sequenciais são uma aproximação que tem sido utilizada, com moderado sucesso, para avaliar o P orgânico disponível nos solos (Blake et al., 2003).

Com o objetivo de quantificar as formas orgânicas e inorgânicas de P num Latossolo Roxo distrófico argiloso sob três densidades de plantio de cafeeiros, procedeu-se uma extração sequencial de formas de fósforo (Pavan & Chaves, 1996). Os autores obtiveram a seguinte ordem crescente de extração: P-lábil (5% do P-total)<P-pouco lábil (30% do P-total)<P-não lábil (65% do P-total), após 15 anos de cultivo. O efeito da densidade populacional nas formas de P no solo refletiu apenas na fração P-lábil, na camada de 0 a 5cm de profundidade, que foi maior para uma maior população de plantas por hectare.

Cardoso et al. (2002) estudaram a dinâmica de P em cafeeiros sob sistema convencional e agroflorestal com diferentes idades de cultivo. Observou-se que o fósforo inorgânico no sistema convencional aumentou, em todas as profundidades estudadas, com o passar do tempo.



Evidenciou-se que a razão entre o P orgânico sobre o P total foi maior no manejo agroflorestal após 20 anos de cultivo.

Santos et al. (2008) avaliaram fontes e modos de aplicação de fosfatos, por meio da técnica do fracionamento de Hedley et al. (1982), num Argissolo Vermelho cultivado com milho. Os autores constataram que o parcelamento das adubações favoreceu de maneira positiva as frações inorgânicas de P e também as frações orgânicas, quando aplicadas fontes solúveis. Também houve grande participação do P-residual no P-total, entretanto, com evidências de que essas frações menos lábeis também participaram no suprimento de P para as plantas, uma vez que diminuíram a sua participação sobre o P total com o tempo.

Analisando-se o comportamento do P em diferentes sistemas de cultivo (frequentemente cultivado-arroz; raramente cultivado-pasto e não cultivado, savana por quinze anos) Oberson et al.(2001) verificaram um maior acúmulo de P resina, P-NaHCO<sub>3</sub> e P-NaOH no cultivo contínuo com arroz, com maior porcentagem no compartimento NaOH. Além disso, os dois últimos sistemas de cultivo apresentaram maior atividade biológica, indicando disponibilidade de P devido a uma maior mineralização da matéria orgânica do solo.

Neste contexto, as metodologias de fracionamento de P (Chang & Jackson, 1957; Hedley et al., 1982; Bowman, 1989 e outras) têm sido importantes na predição da quantidade de P no solo, bem como o seu comportamento, sem mencionar o potencial que a técnica apresenta, se associada aos extratores de rotina para melhor compreensão da dinâmica e disponibilidade deste nutriente para as plantas.

## 2.4 Fósforo no cafeeiro

O cafeeiro (*Coffea arabica* L.) é uma das principais culturas difundidas no Brasil, tendo, além de caráter econômico, alto significado social, pois demanda grande quantidade de mão-de-obra. O país é o maior produtor de café do mundo e também o segundo maior consumidor do produto. Atualmente, possui, aproximadamente, 2,1 milhões de hectares de área plantada, responsável por 33,74 milhões de sacas beneficiadas produzidas em 2007/08 e participa com 6,2% das exportações do agronegócio brasileiro, possuindo, entretanto, baixa ou média produtividade, com 16,25 sacas beneficiadas por hectare, neste mesmo ano (Companhia Nacional de Abastecimento-Conab, 2009).

A grande maioria das culturas perenes apresenta baixa resposta a P na fase de produção em muitos solos, o mesmo não acontecendo na fase de formação. O mecanismo de acúmulo de formas de reserva de P nas plantas perenes deve ter evoluído em razão dos maiores e mais prolongados déficits hídricos a que essas plantas estão sujeitas ao longo dos anos, se comparadas às plantas de ciclo anual (Novais & Mello, 2007). Na fase de formação do cafeeiro, acredita-se que o P seja muito importante, uma vez que a planta apresenta ainda um pequeno sistema radicular (Melo et al., 2005). Com o crescimento das raízes, um maior volume de solo é explorado, suprindo a planta de sua demanda por este nutriente. Além disso, as associações micorrízicas podem contribuir para a ampliação da capacidade de absorção de P pela planta (Saggin-Júnior et al., 1994; Saggin-Júnior & Siqueira, 1995).

O fósforo é um dos macronutrientes menos exigidos e exportados pela cultura do cafeeiro (Malavolta, 1986). É bem aceito, por diversos

pesquisadores, que esta cultura responde a incrementos de P apenas em sua fase inicial de desenvolvimento no momento do plantio e da formação da lavoura. Entretanto, na fase de produção, a resposta a este nutriente parece ser apenas ocasional. Em revisão feita por Uribe H. & Mestre M. (1976), encontraram respostas a P na fase de produção apenas em um trabalho em El Salvador, dentre 13 outros de diversas partes do mundo. Nessa publicação, os autores apresentaram os resultados de um experimento repetido em oito localidades da Colômbia, concluindo que o efeito de P era ocasional e de pouca magnitude, considerando dispensável a sua aplicação. No Brasil, o cafeeiro também foi considerado pouco responsivo à aplicação de fósforo em lavouras em produção (Bataglia, 2004), tendo as pesquisas, por muito tempo, consolidado este conceito. Neste contexto, tem-se como certa que a resposta a P não é denominador comum nos solos cafeeiros do mundo. Entretanto, existem alguns resultados “atípicos” na literatura sobre a resposta do nutriente para essa cultura.

Em um experimento no Havaí, em que as exigências de N não eram totalmente satisfeitas, obtiveram-se respostas a P na produção, proporcionando acréscimos de 20,4%, 30,1% e 30,9%, respectivamente, nos três anos seguintes após o início desta suplementação (Coil et al., 1961).

Respostas a P no primeiro biênio de produção foram encontradas quando o índice de pluviosidade foi alto, em um LV orto, da região de Campinas, SP. As doses utilizadas foram de 0, 40 e 80 g de  $P_2O_5$ /cova como superfosfato simples e os aumentos foram da ordem de 16%, quando comparados às produções entre 40 e 80 g de  $P_2O_5$  e de 66%

quando comparadas as doses de 0 e 80 g de  $P_2O_5$ /cova (Moraes et al., 1974). Num outro ensaio, a partir da análise conjunta de cinco produções, em um Podzólico Vermelho Escuro no Sul de Minas, encontraram-se respostas lineares a P quando adicionadas as quantidades de 0, 60 e 120 g/cova de  $P_2O_5$ , tendo como fonte o superfosfato simples (Souza & Caixeta, 1974).

Uribe H. (1983), testando a resposta à aplicação de fósforo em cafeeiros *Coffea arabica* variedade Caturra, em seis localidades da Colômbia, observou aumentos da ordem de 15% da produção acumulada em quatro safras seguidas, para dois dos locais estudados, em relação à testemunha sem aplicação de P.

Em um outro trabalho no Sul de Minas, respostas à aplicação de doses crescentes de P foram encontradas em três solos de baixa fertilidade natural, duas áreas sob Latossolo Vermelho Escuro e uma área sob Latossolo Vermelho Escuro húmico (Guimarães, 1986). Este autor testou as doses do nutriente em função da presença ou da ausência da aplicação de esterco de galinha, observando resposta à aplicação de P apenas na ausência da adição do adubo orgânico no solo. Nesse ensaio, estabeleceu-se a relação entre teores de P no solo, pelo extrator Mehlich-1 e a produção relativa, a partir de dados de todos os locais e anos em que as respostas à adubação com este nutriente foram significativas (anos de alta produção). Estabeleceram-se classes de fertilidade do solo correspondentes a produções relativas de 70%, 90% e 100% da produção máxima, onde os teores de P no solo foram, respectivamente, de 5,5, 9,2 (nível crítico) e 11,7  $mg\ dm^{-3}$ .

Após utilização de doses crescentes de 0, 30, 60 e 90 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> em cafeeiros adensados, Gallo et al. (1999) observaram aumento de 16% de produtividade, comparando a maior dose com a testemunha. A produtividade máxima obtida foi de 46,8 sacas de café beneficiado ha<sup>-1</sup> com a aplicação de 90 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Prezotti & Rocha (2004) observaram aumentos da ordem de 12% de produtividade quando avaliaram a produção de cafeeiros em densidades de plantio diferentes por cinco safras consecutivas, submetidos a doses de 0, 60, 120 e 180 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

Resultados recentes utilizando doses crescentes de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, variando de 0 a 400 kg ha<sup>-1</sup>, mostraram respostas lineares do cafeeiro irrigado com incremento de 73,4% de produção com essa última dose em relação à testemunha, numa média de três safras (Guerra et al., 2007). Os autores questionaram os atuais critérios de recomendação de adubação fosfatada para o cafeeiro, uma vez que, em áreas comerciais em produção onde existe um acompanhamento, plantas cultivadas em solos com teores de P de 50 mg dm<sup>-3</sup> apresentavam sintomas de deficiência do nutriente, pouca formação de gemas e pegamento de florada, quando não recebiam adubação fosfatada. Por outro lado, áreas com 5 mg dm<sup>-3</sup> de P no solo, que receberam doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> próximas àsquelas máximas recomendadas pelos órgãos oficiais, que indicam 80 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais-CFSEMG, 1999) e 100 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (Raij et al., 1997) quando a disponibilidade do nutriente era baixa no solo e a expectativa de safra era alta, apresentaram bom desempenho no desenvolvimento de gemas reprodutivas e no pegamento da florada. Tais observações contradizem as recomendações oficiais, que

não funcionaram em todas as situações de campo. Os autores também mostraram resultados promissores de lavouras de sequeiro no Sul de Minas, que tiveram alta média de produtividade e, ainda, conseguiram vegetar para o ano seguinte, minimizando a bienalidade da cultura quando se aplicavam  $300 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , independentemente de se considerarem os teores de P pela análise de solo.

Contudo, existe uma demanda por respostas em termos de comportamento desse nutriente no solo sob a aplicação de elevada quantidade de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , para que ocorram maior produtividade e minimização da bienalidade. Questiona-se se realmente a planta está utilizando a maior parte dessa quantidade aplicada e se há necessidade de aplicar o nutriente todos os anos ou se existe uma forma de melhor aproveitá-lo no solo quando ele se encontra presente em quantidades consideráveis.

O fracionamento de P é uma das ferramentas para caracterizar o nutriente no solo, em função de sua disponibilidade para as plantas, a curto e a longo prazos, por meio da determinação de compartimentos de P com diferentes graus de estabilidade química (Silva et al., 2003). Neste contexto, as metodologias de fracionamento de P têm sido importantes na predição da quantidade de P no solo, bem como o seu comportamento, sem mencionar o potencial que a técnica apresenta, se associada aos extratores de rotina para melhor compreensão da dinâmica e da disponibilidade de P para as plantas.

### 3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANGHINONI, I. Fatores que interferem na eficiência da adubação fosfatada. In: YAMADA, T; ABDALLA, S.R.S. (Ed.). **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: Potafos/Anda, 2004. p. 537-558.

ARAÚJO, M. S.; SALCEDO, I. H. Formas preferenciais de acumulação de fósforo em solos cultivados com cana-de-açúcar na região nordeste. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.21, n.4, p. 643-650, out./dez. 1997.

BARBOSA FILHO, M. P.; KINJO, T.; MURAOKA, T. Relações entre fósforo “extraível”, frações inorgânicas de fósforo e crescimento do arroz em função de fontes de fósforo, calagem e tempo de incubação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 11, n.2, p. 147-155, maio/ago. 1987.

BATAGLIA, O.C. Resposta à adubação fosfatada na cultura do café. In: YAMADA, T; ABDALLA, S.R.S. (Ed.). **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: Potafos/Anda, 2004. p. 307-328.

BLAKE, L.; JOHNSTON, A.E.; POULTON, P.R.; GOULDING, K.W.T. Changes in soil phosphorus fractions following positive and negative phosphorus balances for long periods. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 254, p. 245-261, n. 2, July 2003.

BOWMAN, R.A. A sequential extraction procedure with concentrated sulfuric acid and dilute base for soil organic phosphorus. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 53, n.2, p. 362-366, Mar./Apr.1989.

CARDOSO, I.M.; MEER, P.van; OENEMA, O.; JANSSEN, B.H.; KUYPER, T.W. Analysis of phosphorus by <sup>31</sup>P NMR in Oxisol under agroforestry and conventional coffee systems in Brazil. In: WORLD CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 17., 2002, Bangkok. **Proceeding...** Bangkok: Soil and Fertilizer Society of Thailand, 2002. v. 1. p. 10.

COMISSÃO DE FERTILIDADE DE SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, MG, 1999. p. 289-302.

CHANG, S. C.; JACKSON, M. L. Fractionation of soil phosphorus. **Soil Science**, Baltimore, v.84, n. 1, p. 133-144, Aug. 1957.

CONTE, E.; ANGHINONI, I; RHEINHEIMER, D.S. Frações de fósforo acumuladas em latossolo argiloso pela aplicação de fosfato no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.27, n. 5, p. 893-900, set./out. 2003.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conabweb/index.php?PAG=132>>. Acesso em: 10 jan. 2009.

COOIL, B.J.; WATANABE, Y.; FUKUNAGA, E.T.; NAKATA, S. Responses to phosphate in coffee. **Technical Progress Report Hawaii Agricultural Experiment Station**. Honolulu, n. 133, 8 p. 1961.

CUNHA, G.M.; GAMA-RODRIGUES, A.C.; COSTA, G.S.; VELLOSO, A.C.X. Fósforo orgânico em solos sob florestas montanas, pastagens e eucalipto no norte fluminense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, n. 4, p. 667-672, jul./ago. 2007.

GALLO, P.B.; RAIJ, B.van; QUAGGIO, J.A.; PEREIRA, L.C.E. Resposta de cafezais adensados à adubação NPK. **Bragantia**, Campinas, v. 58, n. 2, p. 341-351, 1999.

GUERRA, A.F.; ROCHA, O.C.; RODRIGUES, G.C.; SANZONOWICZ, C.; RIBEIRO FILHO, G.C.; TOLEDO, P.M.R.; RIBEIRO, L.F. Sistema de produção de café irrigado: um novo enfoque. **ITEM**, Brasília, n.73, p. 52-61, 2007.

GUERRA, A.F.; ROCHA, O.C.; RODRIGUES, G.C.; SANZONOWICZ, C. Manejo da irrigação do cafeeiro, com estresse hídrico controlado, para uniformização de florada. In.: ZAMBOLIM, L. (Ed.). **Boas práticas agrícolas na produção de café**. Viçosa, MG: UFV, 2006.



GUIMARAES, P.T.G.; LOPES, A.S. Solos para o cafeeiro: características, propriedades e manejo. In: RENA, A.B.; MALAVOLTA, E.; ROCHA, M.; YAMADA, T. (Ed.). **Cultura do cafeeiro: fatores que afetam a produtividade**. Piracicaba: POTAFOS, 1986. p. 115-161.

GUIMARÃES, P.T.G. **Respostas do cafeeiro (*Coffea arabica* L. cv. Catuaí) à adubação mineral e orgânica em solos de baixa fertilidade do Sul de Minas Gerais**. 1986. 140p. (Tese de Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.

HEDLEY, M.J.; STEWARD, W.B.; CHAUHAN, B.S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fraction induced by cultivation practices and laboratory incubation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 46, n. 5, p. 970-976, Sept./Oct. 1982.

LOPES, A.S. **Solos sob cerrado: características, propriedades e manejo**. Piracicaba: Instituto da Potassa e Fosfato, 1983. 162 p.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006. 631 p.

MALAVOLTA, E. Nutrição, adubação e calagem para o cafeeiro. In: RENA, A.B.; MALAVOLTA, E.; ROCHA, M.; YAMADA, T. (Ed.). **Cultura do cafeeiro: fatores que afetam a produtividade**. Piracicaba: Potafos, 1986. p. 136-274.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. New York: Academic, 1995. 887p.

MARTINEZ, H.E.P.; GUIMARÃES, P.T.G.; GARCIA, A.W.R.; ALVAREZ V., V.H.; PREZOTTI, L.C.; VIANA, A.S.; MIGUEL, A.E.; MALAVOLTA, E. CORRÊA, J.B.; LOPES, A.S.; NOGUEIRA, F.D.; MONTEIRO, A.V.C.; OLIVEIRA, J.A. Cafeeiro. In.: COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª Aproximação**. Viçosa, MG, 1999, p. 143-168.

MELO, B.; MARCUZZO, K.V.; TEODORO, R.E.F.; CARVALHO, H.P. Fontes e doses de fósforo no desenvolvimento e produção do cafeeiro, em um solo originalmente sob vegetação de cerrado de Patrocínio – MG. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 29, n. 2, p. 315-321, Mar./Abr. 2005.

MORAES, F.R.P.; CERVELINI, G.S.; LAZZARINI, W. Adubação química com N, P, K, B e Zn em cafeeiros plantados em Latossolo Vermelho Amarelo Orto da região de Campinas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEIRAS, 2., 1974, Poços de Caldas. **Resumos...** Rio de Janeiro: Embrapa, 1974. p. 281-282.

MOREIRA, F. M. de S.; SIQUEIRA, J.O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. Lavras: UFLA, 2006. 729p.

MOTTA, P.E.F.; CURTI, N.; SIQUEIRA, J.O.; RAIJ, B. van; FURTINI NETO, A.E.; LIMA, J.M. Adsorção e formas de fósforo em latossolos: influência da mineralogia e histórico de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 26, n. 2, p. 349-359, abr./jun. 2002.

NOVAIS, R.F.; MELLO, J.W.V. Relação Solo-Planta. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: SBCS, 2007. p.133-204.

NOVAIS, R.F.; KAMPRATH, E.J. Phosphorus supplying capacities of previously heavily fertilized soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.42, n.6, p.931-935, Nov./Dec. 1978.

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

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J.; NUNES, F.N. Fósforo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG; SBCS, 2007. 471-550p.

OBERSON, A.; FRIENSEN, D.K.; RAO, I.M.; BÜHLER, S.; FROSSARD, E. Phosphorus transformations in an Oxisol under contrasting land-use systems: the role of the soil microbial biomass. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.237, n.2, p.197-210, Dec. 2001.

OLIVEIRA, F.H.T.; NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V. V.H; CANTARUTTI, R.B; BARROS, N.F. Fertilidade do solo no sistema plantio direto. **Tópicos em Ciência do solo**. Viçosa, MG, 2002. v.2, p.393-486.

PAVAN, M.A.; CHAVES, J.C.D. Alterações nas frações de fósforo no solo associadas com a densidade populacional de cafeeiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, n. 2, p. 251-256, abr./jun. 1996.

PREZOTTI, L.C.; ROCHA, A.C. Nutrição do cafeeiro arábica em função da densidade de plantas e da fertilização com NPK. **Bragantia**, Campinas, v.63, n.2, p.239-251, maio/ago. 2004.

PROCHNOW, L.I.; ALCARDE, J.C.; CHIEN, S.H. Eficiência agrônômica dos fosfatos totalmente acidulados. In: YAMADA, T; ABDALLA, S.R.S. (Eds.) **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: Potafos/Anda, 2004. p. 605-664.

RAIJ, B. van.; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA.H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2001. 285p.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônômico/Fundação IAC, 1997. 285p (IAC, Boletim Técnico, 100).

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e adubação**. São Paulo: Ceres/Potafos, 1991. 343p.

RAIJ, B. van. Fósforo no solo e interação com outros elementos. In: YAMADA, T; ABDALLA, S.R.S. (Ed.). **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: Potafos/Anda, 2004. p. 107-116.

RHEINHEIMER, D.S.; ANGHINONI, I. Distribuição do fósforo inorgânico em sistemas de manejo de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 1, p. 151-160, Jan. 2001.

RHEINHEIMER, D.S.; ANGHINONI, I.; KAMINSKI, J. Depleção do fósforo inorgânico de diferentes frações provocada pela extração sucessiva com resina em diferentes solos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.24, n. 2, p. 345-354, abr./jun. 2000.

RHEINHEIMER, D.S.; GATIBONI, L.C.; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema de plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 2, p. 576-586, mar./abr. 2008.

SÁ, J.C.M. Adubação fosfatada no sistema plantio direto. In: YAMADA, T; ABDALLA, S.R.S. (Ed.). **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: Potafos/Anda, 2004. p. 201-222.

SAGGIN-JÚNIOR, O.J.; SIQUEIRA, J.O. Avaliação da eficiência simbiótica de fungos endomicorrízicos para o cafeeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 16, n. 1, p. 39-46, jan./abr. 1992.

SAGGIN-JÚNIOR, O.J.; SIQUEIRA, J.O.; GUIMARÃES, P.T.G.; OLIVEIRA, E. Interação fungos micorrízicos versus superfosfato e seus efeitos no crescimento e teores de nutrientes do cafeeiro em solo não fumigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 18, n. 1, p. 27-36, jan./abr. 1994.

SANTOS, J.Z.L.; FURTINI NETO, A.E.; RESENDE, A.V.; CURTI, N.; CARNEIRO, L.F.; COSTA, S.E.V.G.A. Frações de fósforo em solo adubado com fosfatos em diferentes modos de aplicação e cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.32, n. 2, p. 705-714, mar./abr. 2008.

SATO, S.; COMERFORD, N.B. Influence of soil pH on inorganic phosphorus sorption and desorption in a humid brazilian ultisol. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.29, n.5, p.685-694, set./out. 2005.

SILVA, M.A.; NOBREGA, J.C.A.; CURTI, N.; SIQUEIRA, J.O.; MARQUES, J.J.G.S.M; MOTTA, P.E.F. Frações de fósforo em latossolos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 10, p. 1197-1207, out. 2003.

SOUSA, D.M.G. de.; LOBATO, E. Adubação fosfatada em solos da região do cerrado. In: YAMADA, T; ABDALLA, S.R.S. (Eds.) **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: Potafos/Anda, 2004. p.157-200.

SOUSA, D.M.G. de.; LOBATO, E.; REIN, A.T. Adubação fosfatada. In: SOUSA, D.M.G. de; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2.ed. Brasília, DF: Embrapa Cerrados, 2004. p.147-168.

SOUZA, S.P.; CAIXETA, J.V.M. Resposta do cafeeiro Mundo Novo à aplicação de nitrogênio, fósforo, potássio e micronutrientes. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 2., 1974, Poços de Caldas. **Resumos...** Rio de Janeiro: Embrapa, 1974. p. 276.

TAKAHASHI, S.; ANWAR, M.R. Wheat yield, phosphorus uptake and soil phosphorus fraction after 23 years of annual fertilizer application to an Andosol. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 101, n.2, p.160-171, Mar. 2007.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3.ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719p.

URIBE H., A. Efecto del fósforo em la producción de café. **Cenicafe**, Chinchiná, v. 34, n. 1, p. 3-15, ene./mar. 1983.

URIBE H., A.; MESTRE M., A. Efecto de nitrogeno, el fósforo y el potasio sobre la producción de café. **Cenicafe**, Chinchiná, v. 27, n. 4, p. 158-173, oct./dic. 1976.

## CAPÍTULO II

### DINÂMICA E DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO NO SOLO PARA O CAFEIEIRO

#### 1 RESUMO

Resultados recentes de pesquisa mostraram que o cafeeiro demanda uma quantidade anual de fósforo, semelhantemente às culturas de ciclo curto. O presente trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar o “status” do P no solo, em função da aplicação anual de doses de P, por meio da quantificação de frações de P lábeis, moderadamente lábeis, pouco lábeis e total, associando-as às respostas das plantas de café. Foram analisados dois experimentos em áreas com cafeeiros em produção: (a) num Latossolo Vermelho distrófico típico (LVd), área irrigada localizada em Planaltina, DF, submetida à adubação fosfatada anual de 0, 50, 100, 200 e 400 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, como superfosfato triplo, com três repetições em blocos casualizados e (b) num Argissolo Vermelho distrófico típico (PVd), área de sequeiro localizada em Cabo Verde, Sul de Minas Gerais, em dois talhões: um que recebeu a dose de 300 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, sendo 2/3 como superfosfato simples e 1/3 como termofosfato magnésiano e outro onde não se utilizou adubo fosfatado no ano agrícola avaliado. As amostras foram retiradas em blocos casualizados com quatro repetições. Foram determinadas frações de fósforo nas amostras de solo coletadas nas profundidades 0 a 10, 10 a 20 e 20 a 40cm, conforme as metodologias de Hedley et al. (1982) e Bowman (1989). Observou-se que o cafeeiro irrigado responde à adubação fosfatada, em fase de produção, obtendo ganhos de produtividade da ordem de 138% com a aplicação da dose de 400 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> no ano avaliado. Os teores foliares do cafeeiro aumentaram com a aplicação de doses de P e se estabilizaram em torno de 1,9 a 2,0 g kg<sup>-1</sup>. A adição de fósforo ao solo afetou de maneira variável a distribuição das frações de P nas três profundidades avaliadas, promovendo incrementos na maioria das frações de P estudadas. O compartimento de P-biodisponível apresentou-se como maior reservatório de P do solo, embora o P-residual estimado tenha apresentado participação bastante expressiva na camada de 0 a 10cm.

## 2 ABSTRACT

Recent research data showed that coffee (*Coffea arabica* L.) plants demand phosphorus annual quantity similar to short cycle crops. This work was carried out with the objective of evaluating the influence of annual phosphorus fertilization on soil phosphorus status through labile, moderate-labile, low-labile and total P fractions quantification associating them to coffee yield. Two experiments were carried out in two coffee production areas: (1) in a typical dystrophic Red Latosol (Oxisol), located in an irrigated area - Planaltina, DF, with triple superphosphate annual fertilization of 0, 50, 100, 200 and 400 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> in randomized blocks with three replications; (2) in a typical dystrophic Red Argisol (Ultisol), located in an area without irrigation - Cabo Verde - south of Minas Gerais, in two production areas: one receiving 300 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, being 2/3 applied as simple superphosphate and 1/3 as magnesium thermophosphate, and another with no P fertilization in the evaluated agricultural years, in randomized blocks with four replicates. Phosphorus fractions were determined in soil samples collected at three depths: 0-10, 10-20 and 20-40cm, according to Hedley et al. (1982) and Bowman (1989) methodologies. It was observed that the irrigated coffee plant responded to phosphorus fertilization, obtaining gains up to 138% of productivity with the application of 400 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> dosis. The leaves P content increased with soil P application doses and stabilized around 1.9 to 2.0 g kg<sup>-1</sup>. The soil P addition influenced the P fractions at all three depths studied. The bio-available P compartment showed to be the highest soil P reservoir, although the estimated residual P showed substantial values at 0-10cm depth.

### 3 INTRODUÇÃO

O avanço da agricultura no Brasil tem ocorrido, principalmente, em direção às áreas de Cerrado, cujos solos têm boas propriedades físicas e topografia favorável a mecanização. Entretanto, a maioria dos solos brasileiros dessas regiões apresenta limitações ao estabelecimento e ao desenvolvimento de grande parte das culturas, em decorrência dos efeitos da elevada acidez, altos teores de alumínio trocável e deficiência generalizada de nutrientes, principalmente o fósforo (Sousa et al., 2007). Os teores de P disponível nesses solos estão, em geral, muito abaixo dos níveis críticos, limitando o desenvolvimento normal das culturas (Lopes, 1983) e, portanto, são grandes as quantidades de P a serem aplicadas para manter a disponibilidade adequada do nutriente para as plantas (Sousa et al., 2004).

Em decorrência das reações de equilíbrio nos solos ácidos, o P predomina na solução do solo como íons ortofosfato ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ). Na fase sólida do solo ele combina principalmente com metais como ferro e alumínio, e com o cálcio, ocorrendo também na matéria orgânica (Raij et al., 2001). Por outro lado, existe o fato de os solos brasileiros serem ricos em óxidos hidratados de ferro e alumínio que, juntamente com a caulinita, constituem a maior parte da composição mineralógica da fração argila do solo, a parte mais ativa na qual ocorrem as reações do fósforo com esses compostos (Raij, 2004).

Para a tomada de decisão sobre a necessidade de adição e definição das doses e modos de aplicação de fertilizantes fosfatados, é importante compreender os fenômenos básicos da dinâmica do P no solo,



que está associada aos fatores ambientais que controlam a atividade dos microrganismos, os quais imobilizam ou liberam os íons ortofosfato, e às propriedades físicas, químicas e mineralógicas do solo. Assim, nos solos altamente intemperizados, predominam as formas inorgânicas de P ligadas à fração mineral e as formas orgânicas estabilizadas física e quimicamente, as quais podem ser enquadradas como lábeis e não-lábeis, com relação ao grau de estabilidade desses compostos (Rheinheimer et al., 2008).

As espécies diferem quanto à capacidade de crescimento em função dos níveis de P no solo (Bhadoria et al., 2002). O cafeeiro é considerado pouco responsivo a P na fase de produção, uma vez que este é um dos macronutrientes menos exigidos e exportados pela cultura (Malavolta, 1986). Entretanto, alguns resultados de pesquisa têm mostrado que esta cultura responde a aplicação do nutriente em sistemas sob altas produtividades, provavelmente devido à maior demanda por energia para seus processos metabólicos (Guerra et al., 2007). Estes autores ainda questionam os atuais níveis críticos de teores de P no solo para o cafeeiro, determinados pelos atuais extratores de rotina, uma vez que obtiveram resultados positivos em solos com baixo nível de P e resultados abaixo do esperado em solos com altos níveis de P. Dessa maneira, propõem que o cafeeiro precisa de maior suprimento de P na fase de produção, uma vez que a planta demanda energia tanto para suprir o dreno dos frutos como para desenvolver sua parte vegetativa, a qual será responsável pela produção do ano seguinte e, assim, ocorrerá minimização do ciclo bienal da cultura.

Portanto, existe grande preocupação em se buscar métodos para melhor compreender a dinâmica e a disponibilidade do fósforo no solo. Diferentes doses, fontes e formas de manejo têm sido utilizadas com a finalidade de auxiliar a recomendação e o melhor manejo da adubação fosfatada. O fracionamento do P é uma ferramenta para a caracterização do nutriente no solo, em função de sua disponibilidade para as plantas, a curto e a longo prazos, por meio da determinação de compartimentos de P com diferentes graus de estabilidade química (Silva et al., 2003). Neste contexto, as metodologias de fracionamento de P têm sido importantes na predição da quantidade de P no solo, bem como o seu comportamento, sem mencionar o potencial que a técnica apresenta, se associada aos extratores de rotina para melhor compreensão da dinâmica e da disponibilidade de P para as plantas.

O presente trabalho foi realizado com o objetivo de quantificar e avaliar a dinâmica e a disponibilidade das frações de fósforo em solos cultivados com cafeeiros submetidos à aplicação anual de doses de P.

## **4 MATERIAL E MÉTODOS**

### **4.1 Experimentos**

Para a avaliação dos efeitos das diferentes doses de fósforo sobre a dinâmica e a disponibilidade de P em solos sob cultivo de cafeeiros, foram instalados e avaliados dois experimentos.

#### 4.1.1 Experimento I

O experimento foi instalado, em janeiro de 2001, num Latossolo Vermelho distrófico típico (LVd) textura muito argilosa, localizado no município de Planaltina, DF, no Centro de Pesquisa Agropecuária do Cerrado – Embrapa/CPAC. A área experimental está localizada nas coordenadas 15°35'42" Latitude Sul e 47°43'51" Longitude Oeste, à altitude de 1009m.

Segundo a classificação de Köppen, o clima do município é tropical Aw chuvoso, de inverno seco, com temperatura média anual de 23°C. O período seco varia de 5 a 6 meses (abril a setembro) e a precipitação média anual é de 1.400mm, concentrada no período de outubro a março.

Foi utilizada a cultivar Rubi MG-1192, no espaçamento de 2,8 x 0,5m, seguindo-se as recomendações de adubação de plantio da Comissão de Fertilidade de Solo do Estado de Minas Gerais - CFSEMG (1999). A partir da primeira florada, em 2002, iniciou-se a aplicação anual de diferentes doses de fósforo (0; 50; 100; 200 e 400 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), na projeção da copa do cafeeiro, utilizando como fonte o superfosfato triplo, aplicando-se 2/3 da dose em setembro, antes do retorno das irrigações após período de estresse hídrico, e 1/3 entre o final de dezembro e início de janeiro. Este parcelamento não é comumente utilizado na cafeicultura, entretanto, são os períodos de maior demanda do nutriente pela planta (Malavolta, 2006). Foi mantida a mesma adubação de produção para os demais nutrientes aplicando-se anualmente 500 kg ha<sup>-1</sup> de N na forma de uréia, 500 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O na forma de cloreto de potássio e 100 kg ha<sup>-1</sup> de FTE BR10 (Zn=7%; B=2,5; Cu=1%; Fe=4%; Mn=4%; Mo=0,1%;

Co=0,1%) para suprimento de micronutrientes. O N e o K foram parcelados em 4 aplicações de setembro a fevereiro e o tratamento fitossanitário, quando necessário, foi igual para todas as parcelas. O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com três repetições, em que os blocos foram constituídos de três linhas de plantio, sendo a linha central considerada útil e ambas as laterais bordaduras. As parcelas foram constituídas de 10 plantas, sendo as 8 centrais úteis. A área foi irrigada por pivô central, num regime de estresse hídrico moderado conforme Guerra et al. (2006) para sincronização do desenvolvimento de gemas reprodutivas e uniformização da florada.

Em 2005, as plantas do experimento foram podadas, sofrendo um esqueletamento a 0,4m do ramo ortotrópico e um decote a 1,5m de altura. Nas parcelas experimentais, no ano de 2007, foram coletadas amostras de solo em três profundidades, 0 a 10, 10 a 20 e 20 a 40cm, antes das adubações para o ano agrícola 2007/2008. As amostras foram retiradas utilizando-se trado. Para cada profundidade foram retiradas amostras compostas em pontos diferentes, respeitando-se assim a independência das camadas. No ano de 2008, na ocasião da colheita, retiraram-se novamente amostras nessas parcelas, seguindo-se os mesmos procedimentos do ano anterior.

Também foi realizada a coleta de material vegetal em dezembro de 2007, antes da fase de enchimento de grãos, quando foram coletadas folhas do terço médio das plantas, no terceiro par de folhas do ramo plagiotrópico.

#### 4.1.2 Experimento II

O experimento foi conduzido a partir de julho de 2007, na Fazenda Santo Antônio, município de Cabo Verde, MG, região Sul de Minas, num Argissolo Vermelho distrófico típico (PVd) textura muito argilosa.

Segundo a classificação de Köppen, o clima do município de Cabo Verde é do tipo Cwb temperado chuvoso ou subtropical de altitude com temperatura média anual de 18,2°C e precipitação média anual de 1.600mm (Antunes, 1986). O ensaio foi instalado em duas áreas, sob as coordenadas geográficas de 21°28'37" Latitude Sul e 46°21'57" Longitude Oeste, à altitude de 902m.

Utilizou-se uma lavoura em produção, cultivar Icatu amarelo IAC 3282, plantada em 2002, num espaçamento de 2,5 x 0,5m, em uma área conduzida sob adubação convencional, na qual não se aplicava qualquer fertilizante fosfatado desde 2004, quando foram aplicados 126 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> como superfosfato simples (18% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). Numa segunda área, aplicaram-se 300 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> em 2007, sendo 2/3 na forma de superfosfato simples (18% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) e 1/3 na forma de termofosfato magnésiano (18% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). Essa área também recebeu 300 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> no ano de 2006, da mesma forma que em 2007. As adubações com os demais nutrientes para ambas as áreas seguiram as recomendações de Raij et al. (1997). Numa área adjacente, não cultivada e sob vegetação de Brachiaria, também foram retiradas amostras de solo, com a finalidade de ser utilizada como referência no estudo.

Os ensaios foram instalados em blocos casualizados com quatro repetições. Coletaram-se amostras de solo nas camadas de 0 a 10; 10 a 20 e 20 a 40cm de profundidade, em 2007, antes da adubação para o ano

agrícola 2007/2008 e em 2008, no momento da colheita, respeitando-se a independência entre as camadas.

Coletou-se material vegetal na fase de enchimento de grãos, em dezembro de 2007, retirando-se folhas do terço médio das plantas no terceiro par de folhas do ramo plagiotrópico. A estimativa da produção foi realizada por meio da derriça completa de 10 plantas em sequência, fazendo-se nas quatro repetições, ou seja, foram amostradas 40 plantas por área.

#### **4.2 Análises laboratoriais**

Todas as amostras dos materiais de solo dos dois experimentos, tanto por ocasião do início do ensaio (Tabela 1) como posteriormente, foram analisadas nos laboratórios do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras, onde foram caracterizadas química, física e mineralogicamente. Após secagem ao ar, os solos foram passados em peneira de 2mm, sendo as análises químicas (pH em água, K, Ca, Mg, Al, H + Al, P e carbono orgânico) realizadas conforme Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA (1997).

Para a caracterização mineralógica dos solos, utilizaram-se amostras de 0 a 40cm de profundidade. Os teores de óxidos de Fe livres totais foram obtidos por meio de quatro extrações sucessivas com ditionito-citrato-bicarbonato de sódio ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), os teores de óxidos de ferro menos cristalinos por uma extração com oxalato ácido de amônio (Mehra & Jackson, 1960) e os teores de óxidos do ataque sulfúrico determinados conforme Vettori (1969), com modificações de Embrapa (1997). Os teores de caulinita e gibbsita foram estimados por alocação

**TABELA 1** Atributos químicos, físicos e mineralógicos\* originais dos solos, LVd de Planaltina, DF, e PVd de Cabo Verde, MG, nas profundidades 0 a 10, 10 a 20 e 20 a 40cm, por ocasião do início do estudo, em julho de 2007.

Atributos do solo	LVd**			PVd		
	Profundidades (cm)			Profundidades (cm)		
	0 a 10	10 a 20	20 a 40	0 a 10	10 a 20	20 a 40
pH (água)	4,8	4,8	4,5	4,9	4,9	4,8
K (mg dm <sup>-3</sup> )	140	126	91	64	34	31
Ca (cmo <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,0	1,2	0,6	0,3	0,1	0,2
Mg (cmo <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,3	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1
Al (cmo <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,0	0,9	1,0	1,6	1,4	1,2
H + Al (cmo <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	10,4	8,6	8,6	8,4	6,9	6,1
m (%)	40	41	51	69	82	75
Matéria Orgânica (g kg <sup>-1</sup> )	39	33	26	30	21	12
P-Mehlich-1 (mg dm <sup>-3</sup> )	3,3	1,4	1,1	0,9	0,5	0,4
P-resina (mg dm <sup>-3</sup> )	3,9	1,1	2,8	3,7	3,0	2,1
P-remanescente (mg kg <sup>-1</sup> )	4,5	4,3	4,2	9,6	6,8	4,6
Areia (g kg <sup>-1</sup> )	18	18	18	24	24	22
Silte (g kg <sup>-1</sup> )	14	14	10	15	10	14
Argila (g kg <sup>-1</sup> )	68	68	72	61	66	64
	<b>0 a 40 cm</b>					
CMAP (mg kg <sup>-1</sup> )	1187			914		
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> “total” (g kg <sup>-1</sup> )	0,5			1,49		
Caulinita (Ct) (g kg <sup>-1</sup> )	370			410		
Gibbsita (Gb) (g kg <sup>-1</sup> )	270			240		
Hematita (Hm) (g kg <sup>-1</sup> )	13			12		
Goethita (Gt) (g kg <sup>-1</sup> )	84			72		

\* As análises mineralógicas, CMAP e P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> “total” foram feitas para amostras coletadas a 0 a 40cm;

\*\* Para este solo, as análises referem-se ao tratamento correspondente a 0 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>;

<sup>1</sup> Capacidade Máxima de Adsorção de Fósforo.

(Resende et al., 1987) e os de hematita e goethita baseando-se na cor do solo e nos teores de Fe<sub>d</sub> (Torrent et al., 1983). A capacidade máxima de adsorção de P (CMAF) foi estimada conforme Syers et al. (1973). Na

análise física, foi determinada a granulometria da TFSA pelo método da pipeta (EMBRAPA, 1997).

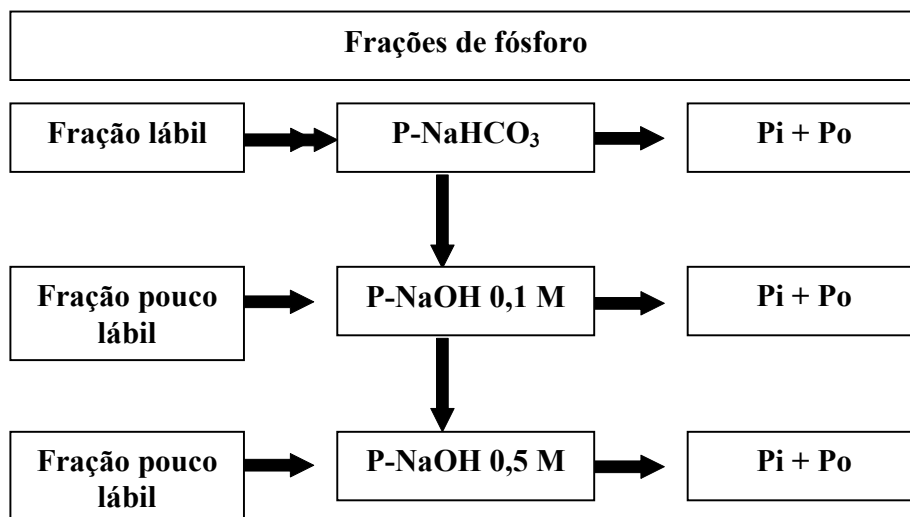
A disponibilidade de P foi avaliada pelos extratores de Mehlich-1 ( $\text{HCl } 0,05 \text{ mol L}^{-1} + \text{H}_2\text{SO}_4 \text{ } 0,0125 \text{ mol L}^{-1}$ ) (EMBRAPA, 1997) e pela resina de troca iônica (Raij et al., 1987). Foram determinadas frações de P segundo Hedley et al. (1982), adaptado para TFSA (Figura 1) e o P total segundo Bowman (1989). No fracionamento proposto por Hedley et al. (1982), o P inorgânico lábil ( $\text{Pi-NaHCO}_3$ ) e o P orgânico ( $\text{Po-NaHCO}_3$ ), adsorvidos nas superfícies dos coloides, foram extraídos com  $\text{NaHCO}_3 \text{ } 0,5 \text{ mol L}^{-1}$ ; o P inorgânico pouco lábil ( $\text{Pi-NaOH}$ ), considerado neste trabalho como moderadamente lábil, associado aos óxidos de Fe e Al e o P orgânico ( $\text{Po-NaOH}$ ), associado aos compostos húmicos, foram extraídos com  $\text{NaOH } 0,1 \text{ mol L}^{-1}$  e o P inorgânico pouco lábil ( $\text{Pi-NaOH}$ ) associado aos óxidos de Fe e Al e o P orgânico ( $\text{Po-NaOH}$ ), associado aos compostos húmicos, foram extraídos com  $\text{NaOH } 0,5 \text{ mol L}^{-1}$ . O P total do solo foi determinado por digestão a  $120^\circ\text{C}$ , em meio ácido concentrado e em meio alcalino (Bowman, 1989). O P foi determinado por colorimetria em todos os extratos, segundo Murphy & Riley (1962).

O P orgânico (Po) foi calculado por diferença entre o P-autoclavado e o P-acidificado, já que a amostra autoclavada inclui o P orgânico mais o inorgânico, enquanto, no extrato acidificado, o P orgânico é separado mediante a precipitação da matéria orgânica.

Com relação ao material de tecido vegetal, as folhas foram secadas, a  $60^\circ\text{C}$ , em estufa de ar forçado, até peso constante. Posteriormente, foram moídas e, por meio do extrato nítrico-perclórico,



foi determinado o teor de P por colorimetria, conforme Malavolta et al. (1997).



**FIGURA 1** Fluxograma operacional de algumas frações de fósforo, conforme Hedley et al. (1982).

#### 4.3 Análises estatísticas

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e testes de média (Skott-Knott, 5%), para avaliar as diferenças entre os tratamentos. No experimento I, foram ajustadas equações de regressão para as diferentes frações de P e para o P total do solo, como variáveis dependentes das doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. No experimento II, utilizou-se a análise de variância conjunta para estudo das variáveis resposta. Todas as análises foram realizadas utilizando-se o programa estatístico SISVAR (Ferreira, 2000).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao final dos dois anos de estudo, pode-se observar que, em ambos os experimentos, os teores de P determinados pelos extratores de rotina aumentaram (Tabela 2 e 3). Os teores de P-remanescente tenderam a aumentar, com a aplicação de fósforo, apenas no Argissolo. Por outro lado, no Latossolo, o qual possui maior CMAP (Tabela 1), o P-rem não apresentou tendência de aumentar, mesmo após vários anos de adubação fosfatada anual. Os dois locais de estudo apresentaram valores baixos de pH e Ca e Mg trocáveis concomitantemente a valores indesejáveis de Al trocável e também de saturação por Al (m%) (CFSEMG, 1999). Isso indica que, em ambos os locais, a prática da calagem não foi realizada ou foi efetuada em subdosagens, o que certamente interferiu no comportamento de P durante o ciclo de desenvolvimento do cafeeiro do presente trabalho.

No que se refere ao P “total” do solo, determinado pelo ataque sulfúrico, os solos apresentaram valores de 0,5 e 1,49 g kg<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, respectivamente para o LVd e PVd (Tabela 1). Nota-se, assim, que há uma considerável reserva do nutriente no solo que, possivelmente, está sendo utilizada pelo sistema radicular da vegetação nativa. A média para os solos brasileiros é de 0,7 g kg<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (Resende et al., 2002).

**TABELA 2** Atributos químicos de um Latossolo Vermelho distrófico típico (LVd) de Planaltina, DF, submetido a diferentes doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, em três profundidades, em amostras coletadas em 2008.

Atributos do solo	Tratamentos (kg ha <sup>-1</sup> de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )														
	0			50			100			200			400		
	Profundidades (cm)														
	0 a 10	10 a 20	20 a 40	0 a 10	10 a 20	20 a 40	0 a 10	10 a 20	20 a 40	0 a 10	10 a 20	20 a 40	0 a 10	10 a 20	20 a 40
pH (água)	4,9	4,8	4,9	4,7	4,7	4,5	4,9	4,7	4,5	4,9	4,7	4,8	4,9	5,0	4,8
K (mg dm <sup>-3</sup> )	105	119	125	61	108	107	112	193	110	114	113	71	80	178	111
Ca (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,6	0,6	0,6	0,7	0,5	0,6	0,6	0,9	0,5	0,7	0,5	0,8	0,8	1,3	0,9
Mg (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,1	0,2	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2	0,2
Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,0	0,8	0,7	1,2	1,0	0,9	1,0	0,7	0,9	1,1	1,0	0,7	1,1	0,6	0,7
H + Al (cmo <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	8,2	7,1	6,5	9,5	7,1	7,4	8,8	6,8	7,1	8,5	8,0	6,8	8,8	6,7	7,1
m (%)	50	42	37	56	50	50	52	30	46	47	53	38	47	25	37
Matéria orgânica (g kg <sup>-1</sup> )	30	25	18	35	26	21	25	30	18	33	25	21	30	25	21
P-Mehlich-1 (mg dm <sup>-3</sup> )	2,9	1,1	1,1	19,6	1,6	1,6	15,4	2,0	1,5	68,4	2,6	2,6	90,6	10,2	2,7
P-resina (mg dm <sup>-3</sup> )	5,6	3,6	1,9	27,3	3,0	3,5	28,4	5,3	3,4	84,9	5,5	6,6	113,8	15,1	8,0
P-remanescente (mg kg <sup>-1</sup> )	9,6	9,0	9,7	11,1	7,6	9,1	10,6	8,8	8,8	11,6	9,6	11,1	13,7	10,1	10,9

**TABELA 3** Atributos químicos de um Argissolo Vermelho distrófico típico (PVd) de Cabo Verde, MG, em três profundidades de amostras coletadas em 2008, em área adubada com P na quantidade convencional e outra área com 300 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

Atributos do solo	Adubação convencional			300 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup>		
	Profundidades (cm)			Profundidades (cm)		
	0 a 10	10 a 20	20 a 40	0 a 10	10 a 20	20 a 40
pH (água)	5,3	4,5	4,5	5,3	5,1	4,8
K (mg dm <sup>-3</sup> )	185	103	75	210	200	178
Ca (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,8	0,2	0,2	3,0	1,7	1,1
Mg (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,8	0,2	0,1	1,0	0,5	0,4
Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,5	2,0	1,9	0,4	0,7	1,1
H + Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	6,7	11,3	9,1	6,4	5,3	6,1
m (%)	15	77	79	9	22	36
Matéria orgânica (g kg <sup>-1</sup> )	24	20	17	23	16	13
P-Mehlich-1 (mg dm <sup>-3</sup> )	4,5	3,3	1,4	72,1	8,3	9,1
P-resina (mg dm <sup>-3</sup> )	5,1	0,4	2,3	75,8	12,0	14,9
P-remanescente (mg kg <sup>-1</sup> )	19,7	15,6	13,4	28,6	22,0	20,0

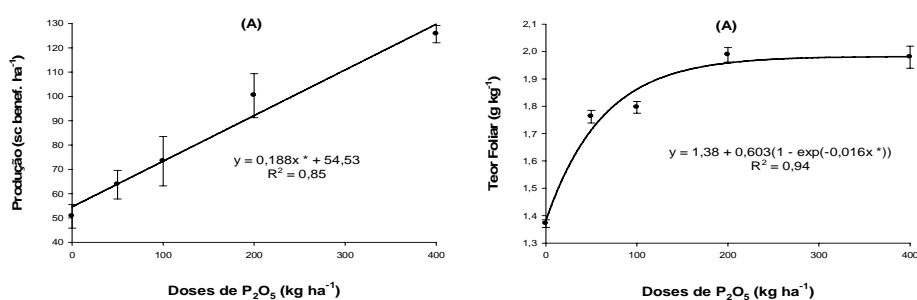
## 5.1 Experimento I

### 5.1.1 Produção e teores foliares

Houve resposta significativa do cafeeiro em função das doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> aplicadas com relação à produção em sacas de café beneficiado ha<sup>-1</sup> e aos teores foliares de P (Figura 2). A produção da safra 2008 do presente experimento comportou-se de maneira linear (Figura 2A), tendo sido possível observar um incremento de 75,2 sacas de café beneficiado ha<sup>-1</sup> ou 138%, quando da aplicação de 400 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> em relação à testemunha sem fósforo, apesar de esta já apresentar uma produtividade considerável (54,5 sacas de café beneficiado ha<sup>-1</sup>). Ressalta-se que este experimento é irrigado.

Estes resultados mostram-se expressivos em relação a alguns resultados encontrados na literatura que apresentam incrementos da ordem de 12% a 16% de produtividade, quando foram avaliadas doses de 0 a 180 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (Gallo et al., 1999; Prezotti & Rocha, 2004). Por outro lado, Guerra et al. (2007) relataram respostas lineares do cafeeiro a doses anuais de fósforo quando obtiveram incrementos médios da ordem de 73,4% de produtividade ou 30,5 sacas de café beneficiado ha<sup>-1</sup>, com relação à testemunha, quando aplicaram doses anuais de 400 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, por três safras consecutivas.

Observando-se as médias de produtividade deste experimento, após seis anos de produção, obteve-se uma variação de 37,6 a 69,9 sacas de café beneficiado ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, respectivamente entre a testemunha e a dose de 400 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, representando um ganho médio de 86% de produtividade, ao longo dos anos analisados (Tabela 4). Pode-se observar, ainda pela mesma tabela, que, de maneira geral, o cafeeiro, quando submetido a doses de 50 e 100 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, não apresenta grande



**FIGURA 2** Produção (A) e teores foliares (B) de cafeeiros irrigados submetidos a diferentes doses anuais de fósforo em um LVd de Planaltina, DF (safra de 2008). \* Significativo, pelo teste de t, a 5%.

**TABELA 4** Médias de produtividade de cafeeiros irrigados, após seis anos de produção, em função de doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, num Latossolo Vermelho distrófico típico (LVd), em Planaltina, DF.

Doses de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg ha <sup>-1</sup> )	Produção* (sacas de café beneficiado ha <sup>-1</sup> )			
	2003/04/05**	2007**	2008	Média Geral
0	41,6 (100%) <sup>1</sup>	49,9 (100%)	50,7 (100%)	37,6 (100%)
50	45,4 (109%)	51,0 (102%)	63,7 (126%)	41,8 (111%)
100	49,2 (118%)	52,3 (105%)	73,3 (145%)	45,5 (121%)
200	56,9 (137%)	64,0 (128%)	100,3 (198%)	55,8 (148%)
400	72,1 (173%)	77,4 (155%)	125,7 (248%)	69,9 (186%)

\* Como realizou-se a poda no ano de 2005, não obteve-se produção em 2006. Entretanto, este ano também é contabilizado na média geral; \*\* Dados do presente experimento extraídos de Guerra et al. (2008). <sup>1</sup> Número entre parênteses refere-se ao percentual de produção em relação à testemunha (dose 0 = 100%).

diferença na sua produtividade, exceto no ano de 2008, quando, notoriamente, a safra do experimento foi muito elevada. Desta maneira, pode-se inferir que essas doses estão suprindo a exigência de P pelos sítios de adsorção do nutriente no solo e não conseguem atender adequadamente as exigências nutricionais dos cafeeiros. É interessante comentar que estas doses estão próximas daquelas recomendadas oficialmente para uma produtividade esperada de 70 sacas de café beneficiado ha<sup>-1</sup> (Raj et al., 1997; CFSEMG, 1999) e, sendo assim, mesmo aplicadas anualmente, não proporcionaram a produtividade esperada na média dos seis anos. Além disso, a produtividade média próxima de 40 sacas de café beneficiado ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> corresponde a produtividade de lavouras bem conduzidas para esse nível de fertilidade.

Cabe aqui comentar que a dose zero, apesar de ser superada pelos demais tratamentos, também obteve boas produtividades ao longo dos anos de condução do ensaio. Isso se deve ao reflexo do preparo de solo no

plantio, quando realizou-se a incorporação de corretivos e adubação fosfatada em área total bem como adição de quantidade complementar dos mesmos no sulco de plantio dos cafeeiros (CFSEMG, 1999). Observa-se ainda que o cultivo é irrigado e existe uma relação muito grande entre a disponibilidade de água e a absorção de nutrientes, principalmente o P que se movimenta até as raízes por difusão.

De maneira geral, os maiores ganhos de produtividade do cafeeiro foram constatados a partir da dose anual de 200 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Entretanto, todas as doses apresentaram incrementos de produção em relação à testemunha sem fósforo, após seis anos analisados (Tabela 4). Assim como na safra de 2008, apresentada neste trabalho, nas safras de 2003 a 2005 e de 2007 foram observados comportamentos lineares de produtividade, em função das doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> estudadas, porém, apresentaram menores inclinações de suas curvas (Guerra et al., 2008). Isso permite inferir, novamente, que, na safra de 2008 obteve-se uma produtividade atípica, muito expressiva em relação às demais safras do experimento, provavelmente em função da poda realizada nas plantas no ano de 2005.

Os teores foliares comportaram-se de maneira exponencial, estabilizando-se a partir da dose de 270 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> em 1,98 g kg<sup>-1</sup>, embora não ocorram diferenças entre as doses de 200 e 400 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (Figura 2B). Esses resultados mostram que as plantas conseguem acumular mais fósforo, em função da maior disponibilidade do nutriente no solo, mas certamente apresentam um acúmulo suficiente do mesmo, pois os teores foliares tenderam a se estabilizar a partir da dose de 270 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. É importante comentar que, nesta fase em que as folhas

foram amostradas, são encontrados os maiores teores foliares de P em plantas de cafeeiro quando estão adequadamente supridas do nutriente (Laviola et al., 2007).

Ainda com relação aos teores foliares, Martinez et al. (2004), em revisão feita com outros seis autores, cita uma faixa de 1,2 a 2,0 g kg<sup>-1</sup> sem considerar regiões específicas produtoras de café. Por esta faixa todos os teores foliares deste trabalho seriam considerados adequados. Destaca-se que não existem faixas adequadas de P para o cafeeiro, especificamente estudadas para a região de Planaltina, DF, e considerar que todos os tratamentos apresentaram teores adequados do nutriente parece não ser correto, pois os mesmos apresentaram diferenças significativas em produtividade (Figura 2A). Neste contexto, cabe destacar que a maior produtividade média do cafeeiro, de 129,7 sacas de café beneficiado ha<sup>-1</sup> em 2008, foi obtida quando o teor foliar de P dessas plantas atingiu o valor médio de 1,98 g kg<sup>-1</sup>.

### **5.1.2 Fracionamento de P no solo**

No presente trabalho, procedeu-se à subdivisão do fracionamento do P em formas lábeis, moderadamente lábeis e pouco lábeis, independentemente da natureza química das mesmas, com a finalidade de melhor compreender a dinâmica e a disponibilidade do nutriente no solo (Rheinheimer et al., 2008).

#### **5.1.2.1 Fósforo disponível**

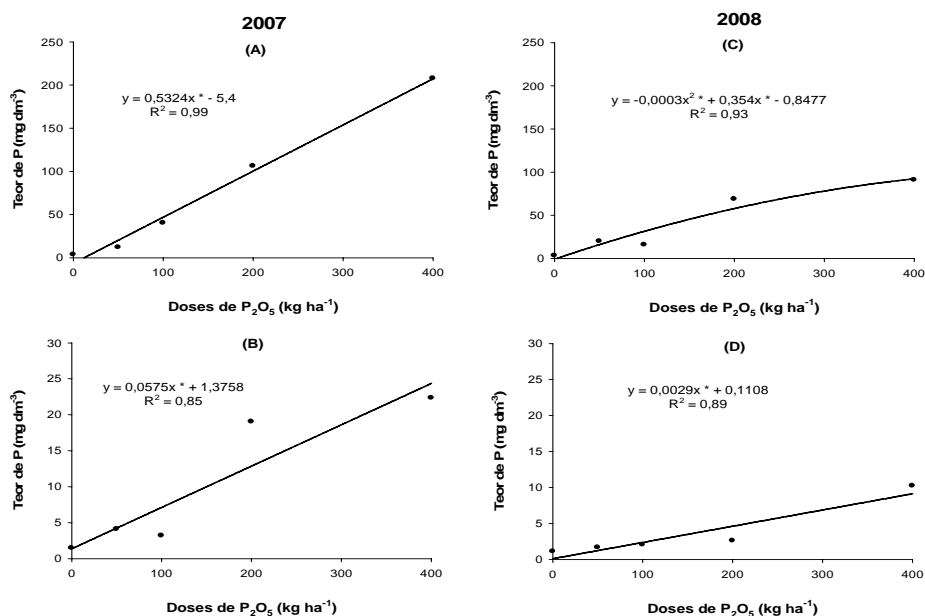
As formas de P consideradas disponíveis para as plantas foram aquelas obtidas pelos extratores de rotina, Mehlich-1 e resina de troca



iônica, e aquelas lábeis obtidas pelo fracionamento de Hedley et al. (1982), constituídas pela soma do  $P_i + P_o - NaHCO_3$   $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ .

Em relação ao P-disponível, observou-se um comportamento semelhante quanto aos resultados obtidos pelos extratores de rotina (Figura 3 e 4) e pelo fracionamento (Figura 5), os quais apresentam aumentos nos teores de P em função do acréscimo das doses de  $P_2O_5$  aplicadas nos dois anos. Embora os teores de P-lábil obtidos por Hedley et al. (1982) estejam aumentando com a aplicação anual de  $P_2O_5$  (Figura 5), quando se analisam seus teores em relação ao P total do solo recuperado por Bowman (1989), observa-se que os mesmos permaneceram constantes e baixos, mesmo após as adubações fosfatadas ao longo dos dois anos de estudo (Tabelas 5 e 6), demonstrando pouca participação deste compartimento em relação ao P-total no solo.

Destaca-se que os maiores teores de P-disponível foram obtidos nas camadas de 0 a 10cm, nos dois anos avaliados, resultados coerentes com a baixa mobilidade do nutriente no solo, uma vez que os fertilizantes são aplicados no cafeeiro sobre o solo, sem incorporação. Os teores de P nessas camadas para os extratores de rotina, de maneira geral, tenderam a diminuir de 2007 para 2008, certamente em virtude das exigências da planta para seu crescimento vegetativo e reprodutivo e de uma produção muito expressiva em 2008 (Figura 2). Ajustes lineares foram obtidos nessa camada, para todas as formas de P-disponível no ano 2007 (Figuras 3A, 4A e 5A) e ajustes quadráticos para o ano 2008 (Figuras 3C, 4C e 5D).

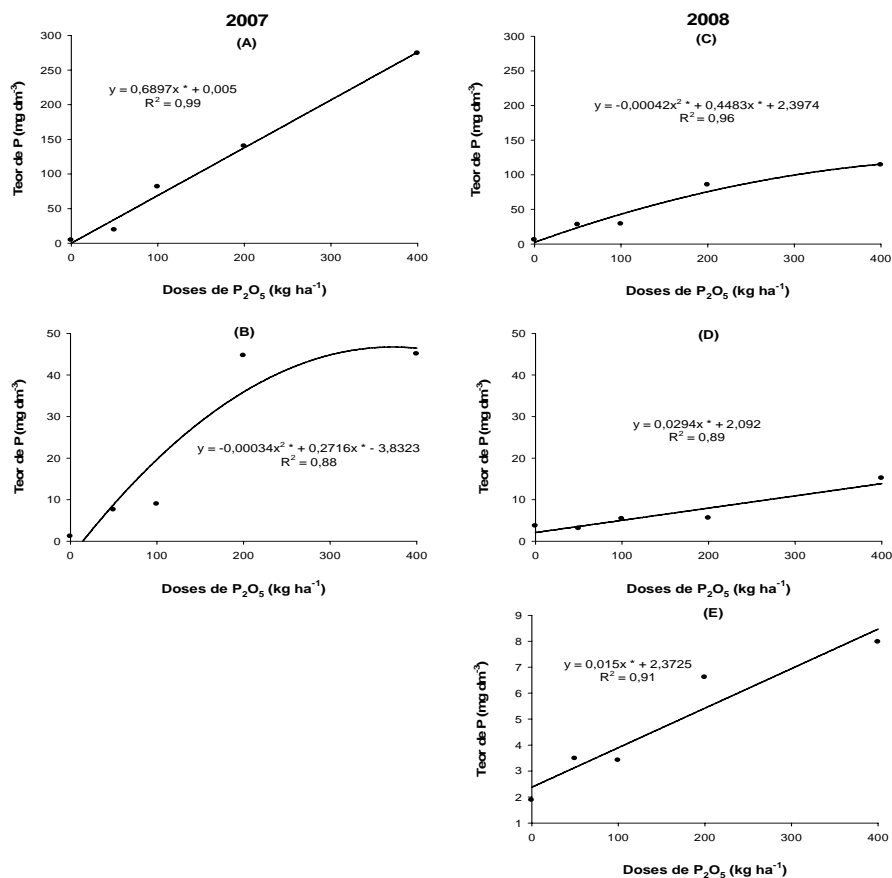


**FIGURA 3** Teores de fósforo disponível pelo extrator de Mehlich-1 no solo, em diferentes profundidades, num LVd de Planaltina, DF, em função da aplicação anual de doses de fósforo, em amostras coletadas em dois anos (A e B = camadas de 0 a 10 e 10 a 20cm, respectivamente, no ano de 2007; C e D = camadas de 0 a 10 e 10 a 20cm, respectivamente, no ano de 2008). \* Significativo, pelo teste de t, a 5%.

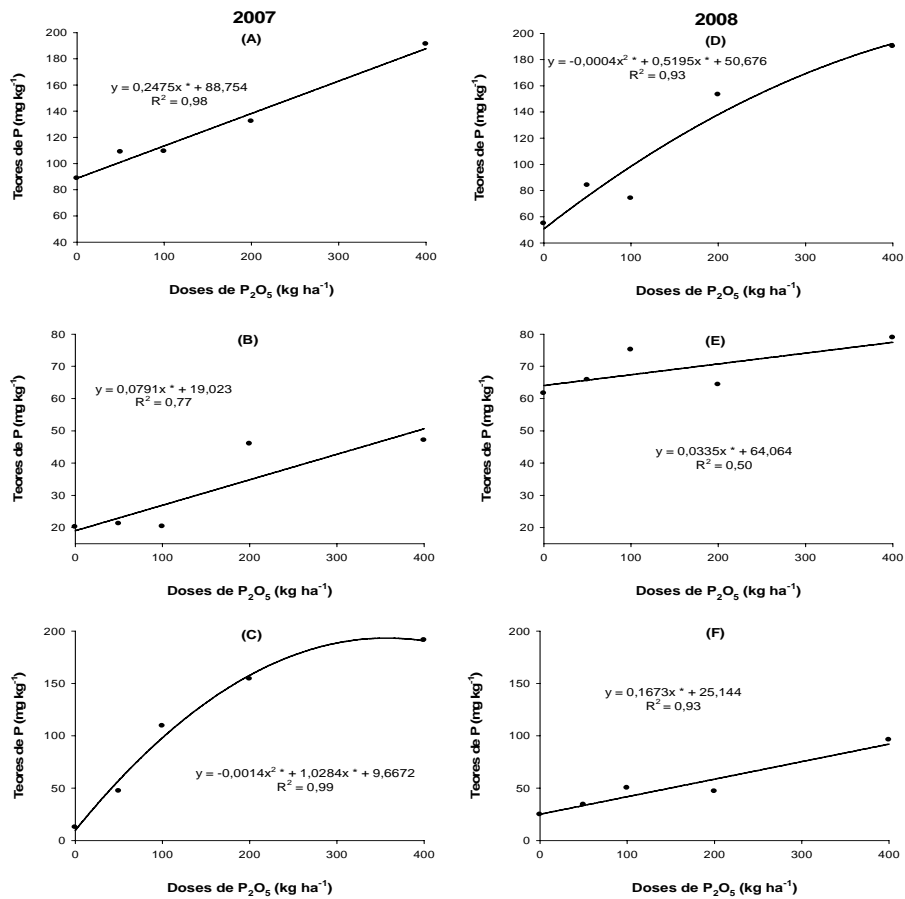
É interessante observar, ainda com relação aos extratores de rotina que, para este solo, muito argiloso, os níveis considerados como muito bons são  $9,0 \text{ mg dm}^{-3}$  e  $30 \text{ mg dm}^{-3}$  pelo Mehlich-1 (CFSEMG, 1999) e pela resina de troca iônica (Raij et al., 1997), respectivamente, para a camada de 0 a 20cm. Segundo essas recomendações, para uma expectativa de produção de 70 sacas de café beneficiado  $\text{ha}^{-1}$ , num solo muito argiloso como este, apresentando os teores acima citados, deveriam ser aplicados 0 ou  $30 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , indicado por cada uma destas

tabelas de recomendação, respectivamente. Quando se substituem estas doses recomendadas na equação estimada da produção em função das doses anuais de  $P_2O_5$  (Figura 2A), obtêm-se, aproximadamente, 54,5 e 60,2 sacas de café beneficiado  $ha^{-1}$ , menos que as 70 sacas esperadas e muito aquém das 129,7 sacas obtidas pela aplicação de 400  $kg ha^{-1}$  de  $P_2O_5$ . Deve-se destacar também que o sistema em estudo é irrigado e, provavelmente, apresenta produtividades superiores às do sistema de sequeiro, mesmo na dose de 0  $kg de P_2O_5 ha^{-1}$ . Logo, esta diferença de produtividade pela recomendação oficial em relação à estimada na Figura 2A poderia ser ainda maior.

Todavia, é importante comentar que o P poderia ser mais disponível para as plantas se os valores de pH do solo estivessem mais elevados, entre 6 e 6,5, quando ocorre maior solubilidade dos compostos fosfatados ligados a Ca, Fe e Al (Lindsay et al., 1989; Malavolta, 2006). Neste contexto, parece estar havendo uma ausência de calagem ou mesmo uma subcalagem da área (Tabela 1 e 2), uma vez que os teores de Ca e Mg são baixos, além de que o Al trocável e a saturação por alumínio (m%) estão elevados (CFSEMG, 1999).



**FIGURA 4** Teores de fósforo disponível pela resina de troca iônica, em diferentes profundidades num LVd de Planaltina, DF, em função da aplicação anual de doses de fósforo, em amostras coletadas em dois anos (A e B = camadas 0 a 10 e 10 a 20cm, respectivamente, no ano 2007; C, D e E = camadas 0 a 10, 10 a 20 e 20 a 40cm respectivamente, no ano 2008).  
 \* Significativo, pelo teste de t, a 5%.



**FIGURA 5** Teores de fósforo lábil no solo, disponível pelo extrator  $\text{NaHCO}_3$   $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ , em diferentes profundidades num LVD de Planaltina, DF, em função da aplicação anual de doses de fósforo, em amostras coletadas em dois anos (A, B e C = camadas 0 a 10, 10 a 20 e 20 a 40cm, respectivamente, no ano 2007; D, E e F = camadas 0 a 10, 10 a 20 e 20 a 40cm, respectivamente, no ano 2008). \* Significativo, pelo teste de t, a 5%.

**TABELA 5** Frações de fósforo em um Latossolo Vermelho distrófico típico (LVd) de Planaltina, DF, cultivado com cafeeiros submetidos a diferentes doses anuais de P, no ano 2007.

Frações de fósforo no solo	Doses de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg ha <sup>-1</sup> )				
	0	50	100	200	400
<b>Profundidade 0 a 10cm</b>					
<b>P-lábil</b>	88,5 (21%)*	108,7 (16%)	109,2 (11%)	132 (10%)	191,0 (15%)
<b>P-moderadamente lábil</b>	327,1 (76%)	245,5 (37%)	447,7 (46%)	678,5 (50%)	776,0 (60%)
<b>P-pouco lábil</b>	98,6 (23%)	149,3 (23%)	115,9 (12%)	142,8 (11%)	163,1 (13%)
<b>P-Σ (Hedley)</b>	514,1 (120%)	503,5 (76%)	672,8 (69%)	953,3 (70%)	1130,1 (88%)
<b>Ptotal Bowman</b>	429,4 (100%)	663,6 (100%)	976,6 (100%)	1359,1 (100%)	1286,1 (100%)
<b>P-residual em Bowman</b>	-**	160,17 (24%)	303,8 (31%)	405,7 (30,0%)	156,0 (12%)
<b>Profundidade 10 a 20cm</b>					
<b>P-lábil</b>	20,1 (7%)	21,1 (7%)	20,3 (5%)	45,9 (7%)	47,0 (6%)
<b>P-moderadamente lábil</b>	224,1 (77%)	234,7 (74%)	211,5 (54%)	164,4 (24%)	166,9 (21%)
<b>P-pouco lábil</b>	141,1 (49%)	160,8 (51%)	77,4 (20%)	104,7 (15%)	109,6 (14%)
<b>P-Σ (Hedley)</b>	385,3 (133%)	416,6 (132%)	309,2 (79%)	315,0 (45%)	323,5 (40%)
<b>Ptotal Bowman</b>	290,0 (100%)	316,0 (100%)	393,4 (100%)	697,9 (100%)	800,8 (100%)
<b>P-residual em Bowman</b>	-	-	84,1 (21%)	383,0 (55%)	477,3 (60%)
<b>Profundidade 20 a 40cm</b>					
<b>P-lábil</b>	12,4 (4%)	47,0 (12%)	109,2 (30%)	154,0 (44%)	191,0 (36%)
<b>P-moderadamente lábil</b>	238,3 (72%)	154,7 (40%)	180,1 (49%)	171,8 (48%)	211,7 (40%)
<b>P-pouco lábil</b>	80,0 (24%)	55,8 (15%)	82,6 (23%)	52,6 (15%)	74,2 (14%)
<b>P-Σ (Hedley)</b>	330,8 (99%)	257,5 (67%)	371,9 (101%)	378,4 (107%)	476,9 (91%)
<b>Ptotal Bowman</b>	332,4 (100%)	382,8 (100%)	367,5 (100%)	354,4 (100%)	524,9 (100%)
<b>P-residual em Bowman</b>	1,7 (1%)	125,3 (33%)	-	-	47,9 (9%)

P-lábil = Pi + Po NaHCO<sub>3</sub> 0,5 M; P-moderadamente lábil = Pi + Po NaOH 0,1 M; P-pouco lábil = Pi + Po NaOH 0,5 M; Σ - Hedley = P-lábil + P-moderadamente lábil + P-pouco lábil; P total Bowman= P determinado conforme (Bowman, 1989); P-residual em Bowman= Ptotal Bowman - P-Σ (Hedley). \* Valores percentuais relativos ao Ptotal Bowman. \*\* Amostras em que o P-residual não pôde ser estimado.

**TABELA 6** Frações de fósforo em um Latossolo Vermelho distrófico típico (LVd) de Planaltina, DF, cultivado com cafeeiros submetidos a diferentes doses anuais de P, no ano 2008.

Frações de Fósforo no solo	Doses de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg ha <sup>-1</sup> )				
	0	50	100	200	400
<b>Profundidade 0 a 10cm</b>					
<b>P-lábil</b>	54,6 (9%)*	83,8 (9%)	73,8 (9%)	152,9 (11%)	189,9 (13%)
<b>P-moderadamente lábil</b>	252,6 (43%)	211,1 (23%)	191,9 (22%)	717,5 (52%)	728,5 (50%)
<b>P-pouco lábil</b>	121,2 (21%)	137,3 (15%)	134,6 (15%)	136,2 (10%)	116,5 (8%)
<b>P-Σ (Hedley)</b>	428,3 (73%)	432,2 (47%)	400,4 (46%)	1006,6 (73%)	1034,8 (71%)
<b>Ptotal Bowman</b>	583,5 (100%)	921,8 (100%)	872,8 (100%)	1371,4 (100%)	1455,2 (100%)
<b>P-residual em Bowman</b>	155,2 (27%)	489,6 (53%)	472,5 (54%)	364,7 (27%)	420,4 (29%)
<b>Profundidade 10 a 20cm</b>					
<b>P-lábil</b>	61,6 (17%)	65,7 (17%)	75,1 (17%)	64,2 (11%)	78,8 (13%)
<b>P-moderadamente lábil</b>	183,1 (50%)	197,1 (50%)	182,9 (40%)	240,2 (40%)	268,5 (43%)
<b>P-pouco lábil</b>	64,4 (18%)	65,0 (16%)	91,1 (20%)	90,5 (15%)	75,7 (12%)
<b>P-Σ (Hedley)</b>	309,0 (85%)	327,8 (82%)	349,1 (77%)	394,9 (65%)	422,9 (67%)
<b>Ptotal Bowman</b>	363,2 (100%)	398,2 (100%)	455,2 (100%)	606,4 (100%)	627,8 (100%)
<b>P-residual em Bowman</b>	54,1 (15%)	70,4 (18%)	106,2 (23%)	211,6 (35%)	204,9 (33%)
<b>Profundidade 20 a 40cm</b>					
<b>P-lábil</b>	24,5 (8%)	34,0 (11%)	50,0 (14%)	46,8 (12%)	95,9 (16%)
<b>P-moderadamente lábil</b>	176,9 (57%)	160,1 (52%)	144,1 (40%)	174,4 (46%)	179,9 (29%)
<b>P-pouco lábil</b>	71,4 (23%)	94,4 (31%)	81,5 (23%)	78,1 (21%)	78,2 (13%)
<b>P-Σ (Hedley)</b>	272,8 (88%)	288,5 (93)	275,7 (76%)	299,3 (79%)	354,0 (57%)
<b>Ptotal Bowman</b>	311,5 (100%)	309,1 (100%)	362,9 (100%)	377,2 (100%)	617,5 (100%)
<b>P-residual em Bowman</b>	38,7 (12%)	20,6 (7%)	87,2 (24%)	77,9 (21%)	263,6 (43%)

P-lábil = Pi + Po NaHCO<sub>3</sub> 0,5 M; P-moderadamente lábil = Pi + Po NaOH 0,1 M; P-pouco lábil = Pi + Po NaOH 0,5 M; Σ – Hedley = P-lábil + P-moderadamente lábil + P-pouco lábil; P total Bowman= P determinado conforme (Bowman, 1989); P-residual em Bowman= Ptotal Bowman - P-Σ (Hedley). \* Valores percentuais relativos ao Ptotal Bowman.

As formas de P das camadas de 10 a 20cm apresentaram ajustes lineares para a maioria dos resultados, exceto para a resina de troca iônica, em 2007 (Figura 4B). Uma vez que a adubação fosfatada foi feita em superfície e sem incorporação, essas camadas, geralmente, apresentaram teores de P bem menores do que aqueles da camada de 0 a 10cm. Em geral, notou-se que os teores de P da camada de 10 a 20cm, para os extratores de rotina, diminuíram mais abruptamente de 2007 para 2008, em relação àqueles da camada superior. Isso evidencia a extração do nutriente dessa camada e a concomitante não reposição do mesmo tão rapidamente como ocorre na camada de 0 a 10cm. Por outro lado, o comportamento do P-lábil pelo extrator do fracionamento de Hedley et al. (1982) não seguiu esta tendência na camada de 10 a 20cm e aumentou de 2007 para 2008, embora os teores desta camada ainda tenham se mostrado de magnitude inferior ao daqueles das demais camadas nos dois anos de estudo.

Houve interação significativa das formas de P das camadas de 20 a 40cm com as doses de  $P_2O_5$  aplicadas para a resina de troca iônica apenas no ano de 2008 e para o extrator  $NaHCO_3$   $0,5 \text{ mol L}^{-1}$  nos dois anos. Nota-se que, para o extrator do fracionamento, a magnitude dos teores obtidos nesta camada não é muito menor que aquela obtida nas camadas superiores, uma vez que o mesmo também extrai o P de formas orgânicas (Hedley et al., 1982) não extraíveis pelos extratores de rotina. Houve ajuste quadrático das formas de P nessas camadas com as doses de  $P_2O_5$  aplicadas apenas para o P-lábil no ano de 2007 (Figura 5C), sendo as demais curvas de respostas de natureza linear (Figura 4E e 5F).



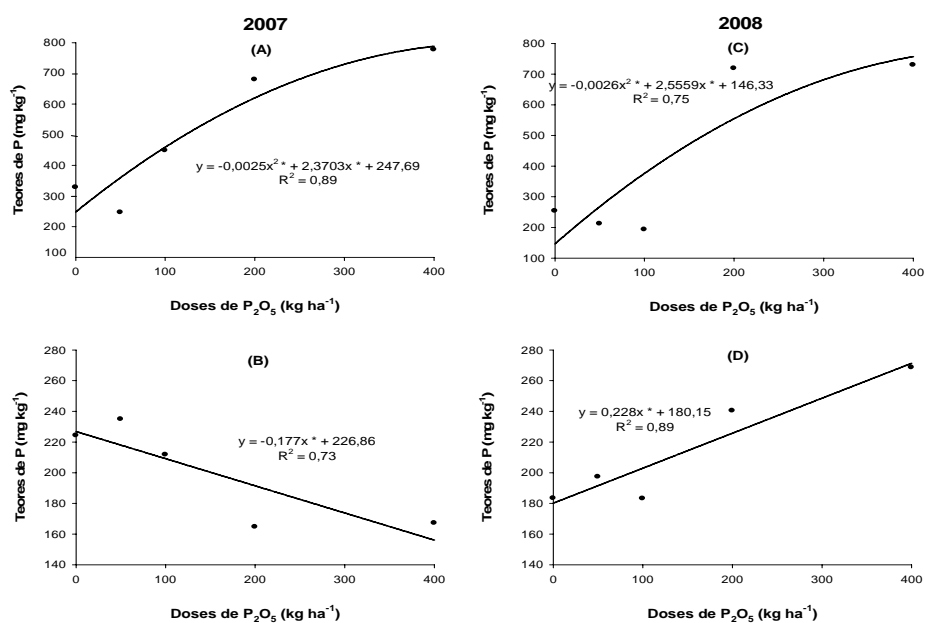
O P-disponível está associado ao conjunto de compostos fosfatados capazes de repor rapidamente a solução do solo, quando o nutriente é absorvido pela planta. Sabe-se que as frações mais lábeis são dependentes do grau de intemperização do solo, textura, mineralogia, teor de matéria orgânica, características físico-químicas, atividade biológica e vegetação predominante (Rheinheimer et al., 2008). Sendo assim, o comportamento da fração de P-disponível pode ser explicado pelo fato de as adubações fosfatadas anuais estarem saturando os sítios de ligação de P na superfície dos coloides do solo, permitindo um aumento de cargas negativas e, dessa maneira, promovendo menor adsorção do P aplicado.

A adsorção de P, através dos complexos de esfera interna em óxihidróxidos de Fe e Al, provoca o aumento das cargas negativas na superfície das partículas do solo incrementando o potencial elétrico negativo superficial (Lima et al., 2000), bem como a carga elétrica líquida e a CTC efetiva (Dyňa & Camargo, 1998), mesmo em solos altamente intemperizados, como os Latossolos das regiões de Minas Gerais e Goiás.

#### **5.1.2.2 Fósforo moderadamente lábil**

Em relação à fração P-moderadamente lábil ( $P_i + P_o$  NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>), observa-se que a mesma correspondeu ao principal reservatório de P do solo, em função do aumento das doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> aplicadas, quando comparada aos demais compartimentos obtidos no fracionamento de Hedley et al. (1982) (Tabela 5 e 6). Com exceção da camada de 10 a 20cm, em 2007, os teores de P apresentaram aumento nas demais camadas, em função do incremento das doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> aplicadas (Figura 6), tendo, na camada de 0 a 10cm, ocorrido ajuste quadrático para os dois

anos (Figura 6A e 6C). Já no ano de 2008, a camada 10 a 20cm apresentou comportamento semelhante ao das demais, mostrando incrementos nos teores de P-moderadamente lábil em função da aplicação das doses de  $P_2O_5$  no solo. De maneira geral, na camada de 0 a 10cm, os teores diminuíram de um ano para o outro, provavelmente em função da absorção do nutriente pelas plantas de café (Figura 2).

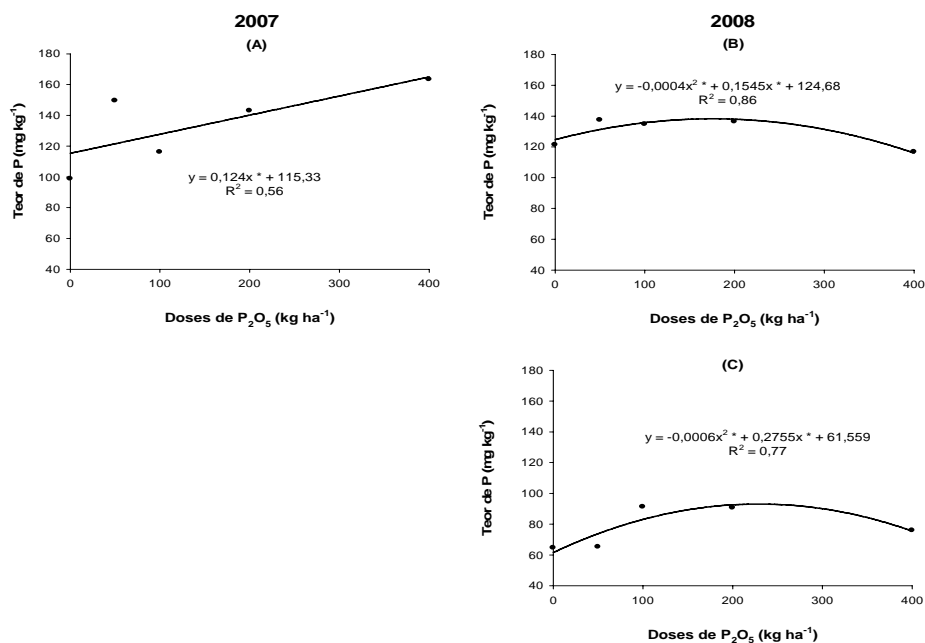


**FIGURA 6** Teores de fósforo moderadamente lábil no solo, disponível pelo extrator NaOH  $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ , em diferentes profundidades num LVD de Planaltina, DF, em função da aplicação anual de doses de fósforo em amostras coletadas em dois anos (A e B = camadas 0 a 10 e 10 a 20cm, respectivamente, no ano 2007; C e D = camadas 0 a 10 e 10 a 20cm, respectivamente, no ano 2008). \* Significativo, pelo teste de t, a 5%.

Os resultados mostram-se coerentes com a literatura, uma vez que em solos oxidicos e intemperizados, como os Latossolos “sob cerrado”, esse compartimento é considerado o maior dreno do P adicionado ao solo (Conte et al., 2003; Santos, 2008) e está estreitamente relacionado aos oxi-hidróxidos de Fe e Al e aos compostos húmicos estáveis (Hedley et al., 1982). Contudo, a fração P-moderadamente lábil, provavelmente, ainda se encontra em equilíbrio com o P-solução, sendo, portanto, capaz de fornecer o nutriente às plantas nos próximos ciclos produtivos (Novais & Smith, 1999).

#### **5.1.2.3 Fósforo pouco lábil**

Os resultados para o compartimento do P-pouco lábil foram significativos apenas para a camada de 0 a 10cm nos dois anos e para a camada de 10 a 20cm, em 2008 (Figura 7). Na camada de 0 a 10cm, em 2007, os teores de P pouco lábil tiveram um comportamento linear em função das doses de  $P_2O_5$  (Figura 7A), entretanto, quando se analisam esses teores nas camadas de 0 a 10 (Figura 7B) e 10 a 20cm (Figura 7C), em 2008, o ajuste quadrático indica incrementos até os pontos de máxima, 193,1 e 229,6  $kg\ ha^{-1}\ P_2O_5$  para 0 a 10cm e 10 a 20cm respectivamente, a partir dos quais os valores passam a diminuir. Ressalta-se que os teores de P neste compartimento apresentam valores de magnitude intermediária, quando comparados às frações P-lábil e P-moderadamente lábil, o que é importante, uma vez que a fração P-pouco lábil (tabelas 4 e 5) é considerada de menor disponibilidade para as plantas (Rheinheimer et al., 2000).



**FIGURA 7** Teores de fósforo pouco lábil no solo, disponível pelo extrator NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup>, em diferentes profundidades num LVd de Planaltina, DF, em função da aplicação anual de doses de fósforo em amostras coletadas em dois anos (A = camada 0-10cm, no ano 2007; B e C = camadas 0 a 10cm e 10 a 20cm, respectivamente, no ano 2008). \* Significativo, pelo teste de t, a 5%.

Quando se observa o comportamento do P nesta fração, no ano 2008, à medida que a quantidade de fosfato adicionada foi maior, a quantidade de P diminuiu. Isso mostra que, certamente, os sítios de adsorção da fração P-pouco lábil foram saturados até as doses correspondentes aos pontos de máxima ou, ainda, que as plantas de café apenas conseguiram aproveitá-lo a partir dos teores correspondentes a estas doses, em virtude da produção proporcionada. Esses resultados são extremamente importantes, pois, via de regra, quando se aplica P no solo,

a adsorção ocorre primeiramente nos sítios de maior estabilidade química e, posteriormente, o nutriente é redistribuído em frações retidas com menor energia e de maior disponibilidade às plantas (Rheinheimer et al., 2000; Conte et al., 2003).

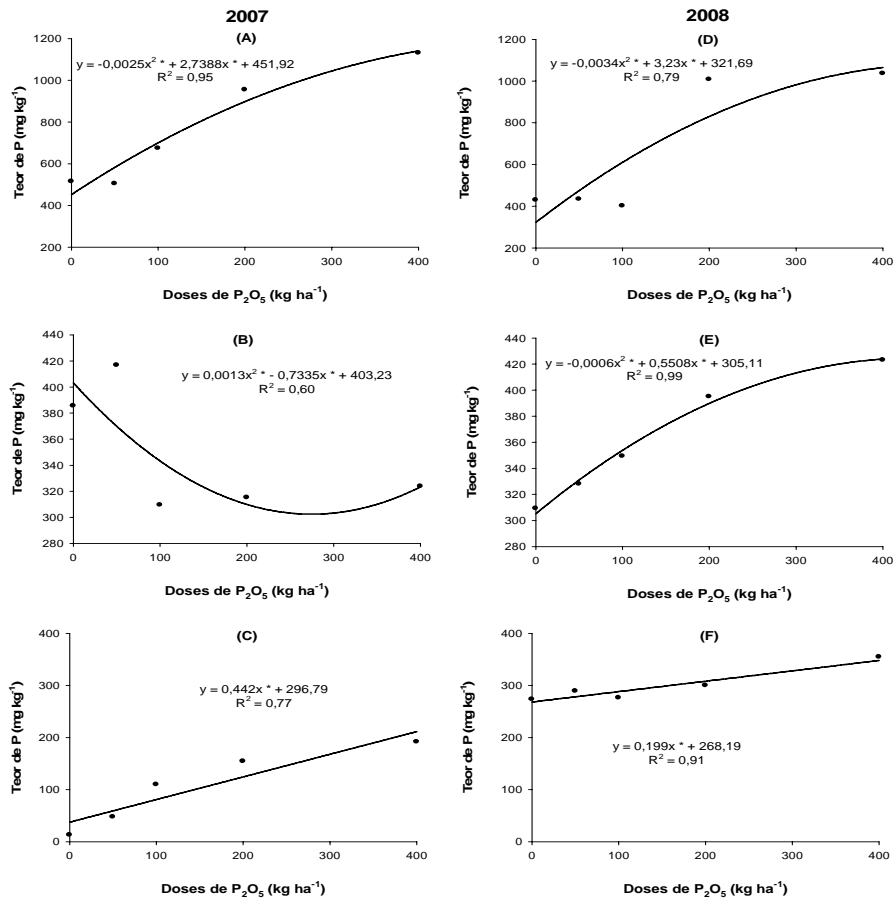
Ao analisar os valores relativos da participação de cada fração em relação à fração de P total Bowman, observa-se que o P-pouco lábil, de maneira geral, diminui com o incremento das doses de  $P_2O_5$ , bem como do ano 2007 para 2008 (Tabela 5 e 6). Por outro lado, pode-se constatar também que o P residual, estimado pela diferença entre o P total Bowman e o P-biodisponível, tendeu a aumentar com o incremento das doses. Neste contexto, o P pouco lábil pode estar sendo transformado em uma forma de estabilidade química ainda mais recalcitrante. Isso acontece devido ao tempo de contato do nutriente com os argilominerais do solo, uma vez que ocorrem reações do tipo específicas, as quais conferem maior estabilidade química entre o P e o solo. Assim, o nutriente tende a deslocar-se em direção às frações não lábeis que não estão mais em equilíbrio com a solução do solo (Novais & Smith, 1999), ou seja, a planta praticamente não consegue absorver P do compartimento P-residual. Nesse caso, apesar da produtividade expressiva do cafeeiro, o nutriente parece estar mais disponível para as plantas até as doses de ponto de máxima (Figura 7B e 7C), próximo a  $200 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $P_2O_5$ , a partir das quais sua disponibilidade tende a ser menor, quando analisada pelo modelo de fracionamento utilizado. Esta constatação é confirmada pelos incrementos dos teores foliares de P (Figura 2B) que tendem a se estabilizar próximos a esta dose de  $P_2O_5$ .

#### **5.1.2.4 Fósforo biodisponível e fósforo total recuperado**

Considerou-se neste trabalho como P-biodisponível o somatório das frações lábeis, moderadamente lábeis e pouco lábeis, obtidas por Hedley et al. (1982), ou P- $\Sigma$  (Hedley), as quais ainda estão em equilíbrio com a solução do solo (Novais & Smith, 1999).

A tendência geral do comportamento do P-biodisponível foi de acréscimos nos teores de fósforo em função da adição de doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (Figura 8). Houve exceção apenas para o P da camada de 10 a 20cm no ano de 2007 (Figura 8B) mas, em 2008, os teores de P desta camada passaram a comportar-se semelhantemente àqueles das demais camadas (Figura 8E). Houve um ajuste quadrático para o teor de P deste compartimento nas camadas de 0 a 10 (Figura 8A e 8D) e de 10 a 20cm (Figura 8B e 8E) e um ajuste linear para a camada de 20 a 40cm (Figura 8C e 8F). Nota-se, ainda, que a magnitude dos teores diminui em função do aumento da profundidade das camadas do solo amostradas.

A avaliação do P-biodisponível é importante por mostrar o comportamento geral do nutriente no solo, uma vez que essas formas de P atuam na biodisponibilidade deste nutriente (Blake et al., 2003; Gatiboni et al., 2007). Desse modo, ao observar a participação relativa das formas de P em relação ao P total Bowman, evidencia-se que as formas de P-moderadamente lábil, de disponibilidade em médio prazo, são aquelas predominantes no solo (Tabelas 5 e 6).



**FIGURA 8** Teores de fósforo biodisponível no solo, em diferentes profundidades num Lvd de Planaltina, DF, em função da aplicação anual de doses de fósforo, em amostras coletadas em dois anos (A, B e C = camadas 0 a 10, 10 a 20 e 20 a 40cm, respectivamente, no ano 2007; D, E e F = camadas 0 a 10, 10 a 20 e 20 a 40cm, respectivamente, no ano 2008). \* Significativo, pelo teste de t, a 5%.

Com relação aos teores de P total recuperado no solo, segundo Bowman (1989), observa-se que os mesmos aumentam em todas as

camadas, em virtude do incremento das doses de  $P_2O_5$  no solo (Figura 9), nos dois anos de estudo. Destaca-se que apenas na dose de  $400 \text{ kg ha}^{-1}$   $P_2O_5$  pode-se observar um aumento expressivo nos teores totais de P, na camada de 20 a 40cm de profundidade (Figura 9C e 9F), mostrando a dificuldade desse nutriente em movimentar-se no perfil do solo (Novais & Smith, 1999; Ceretta et al., 2005).

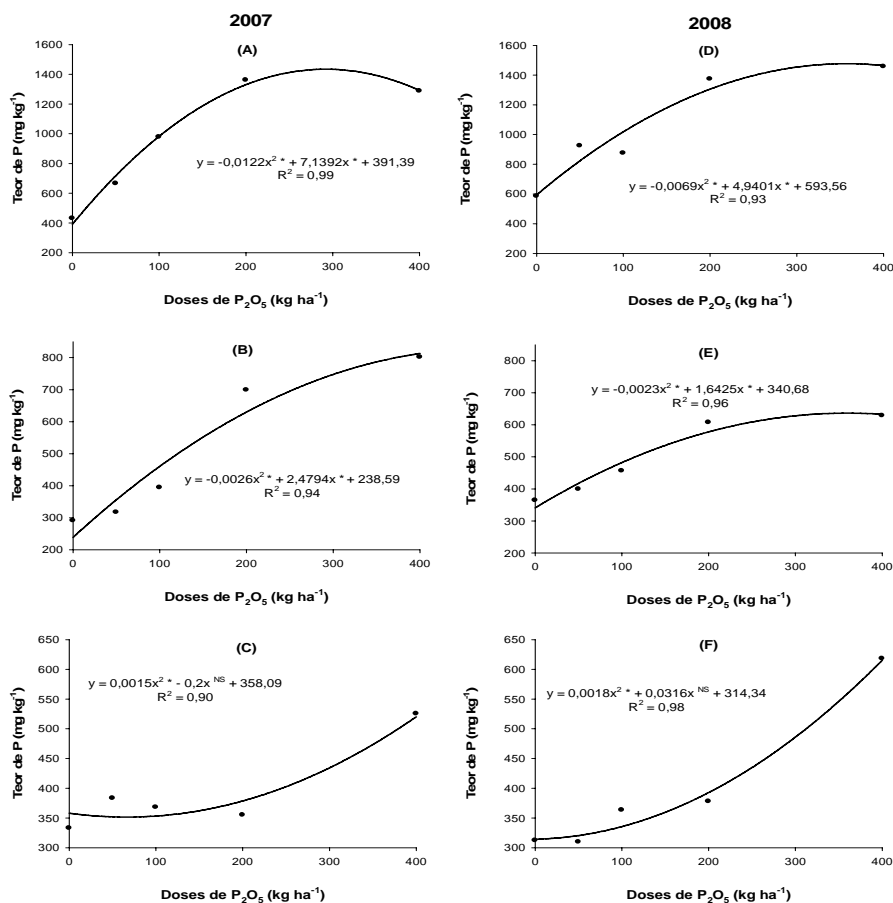
Pela análise dos dados das Tabelas 4 e 5 pode-se observar que, em geral, os teores do P- $\Sigma$  (Hedley) ou P-biodisponível diminuem de um ano para o outro. Atribui-se parte disso à absorção pelas plantas devido às diferenças em produção. Por outro lado, quando se analisam os teores de P-Bowman, provenientes de uma extração mais drástica, verifica-se que os valores, em sua maioria, são maiores que o P-biodisponível e continuam aumentando de um ano para o outro com a aplicação de doses de P, mesmo após uma colheita expressiva do cafeeiro. Isso evidencia que boa parte do P aplicado ao solo está se acumulando em uma forma não biodisponível, o que já era esperado devido à alta capacidade de reter P deste solo (Tabela 1).

Sabe-se que o P desses compartimentos “não disponíveis” ou residuais está relacionado aos oxi-hidróxidos de Fe e Al e à matéria orgânica altamente estável (Rheinheimer et al., 2008), sendo muito difícil conseguir que estes compostos disponibilizem novamente o nutriente para as plantas (Novais & Smith, 1999).

Avaliando a reversibilidade do P não-lábil em Latossolos, Fernández R. et al. (2008) conseguiram recuperar entre 26% e 46% do P aplicado naqueles solos mais oxídicos, após 10 extrações sucessivas com



a resina de troca iônica. De acordo com estes autores, as formas de P não-lábeis são dependentes da goethita e da gibbsita, sendo esta última o



**FIGURA 9** Teores de fósforo total recuperados no solo (Bowman, 1989), em diferentes profundidades num LVd de Planaltina, DF, em função da aplicação anual de doses de fósforo, em amostras coletadas em dois anos (A, B e C = camadas 0 a 10, 10 a 20 e 20 a 40cm, respectivamente, no ano 2007; D, E e F = camadas 0 a 10, 10 a 20 e 20 a 40cm, respectivamente, no ano 2008). \* Significativo, pelo teste de t, a 5%.

mineral de argila que apresenta maiores restrições à dessorção de P. Provavelmente, esta baixa dessorção é ainda mais limitante, em condições de campo, durante os ciclos de produção das culturas, uma vez que vai haver tempo suficiente para que o P obtenha maior estabilidade química com os colóides do solo.

Uma alternativa que pode ser utilizada para aumentar o aproveitamento do P aplicado ao solo é por meio da adição de matéria orgânica (Novais & Smith, 1999) que, ao ser mineralizada, vai proporcionar o aumento da quantidade de ácidos orgânicos no ambiente solo-planta. Esses compostos vão aumentar as cargas negativas do solo, proporcionando maior disponibilidade de P para a cultura (Zalba & Peinemann, 2002; Pavinato & Rosolen, 2008). O incremento de ácidos orgânicos pode ser conseguido por meio da consorciação do cafeeiro com outras plantas nas entrelinhas, como, por exemplo, adubos verdes, quando, por ocasião de roçar a lavoura, os resíduos dessas plantas serão mineralizados e transformados, entre outros, nestes compostos (Amaral et al., 2004).

## **5.2 Experimento II**

A produtividade estimada nas áreas da Fazenda Santo Antônio diferiu significativamente, apresentando 69,5 sacas de café beneficiado ha<sup>-1</sup> na safra de 2008, para a área que recebeu 300 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 38,8 sacas de café beneficiado ha<sup>-1</sup> para aquela adubada convencionalmente. Ressalta-se que, na safra de 2007, as áreas apresentaram, respectivamente, 65 e 8 sacas de café beneficiado ha<sup>-1</sup>. Isso indica que, nesta ocasião,

praticamente não houve bienalidade da produção na área de maior aplicação de P, certamente devido ao suprimento energético proporcionado pelo ajuste na adubação fosfatada (Guerra et al., 2007). Estes autores afirmaram que as plantas de café demandam maior quantidade de P para desenvolver plenamente seu sistema vegetativo, ao mesmo tempo em que conseguem suprir sua produção.

Os teores foliares das plantas de café também diferiram entre as áreas, com valores de 1,91 e 1,65 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente, para as áreas de maior e menor aplicação de P no solo. Isso, certamente, mostra que as plantas conseguem absorver mais P quando o solo possui maiores teores do nutriente indicando também um maior teor foliar de P para áreas com maior produtividade. Os teores observados no presente experimento estão dentro da faixa de suficiência, de 1,2 a 2,0 g kg<sup>-1</sup>, citada em revisão com outros seis autores por Martinez et al. (2004).

Apesar de não poderem ser comparados estatisticamente, os teores de P obtidos pelos extratores de rotina, Mehlich-1 e resina de troca iônica foram maiores em todas as camadas avaliadas nos dois anos de estudo para a área em que se aplicaram 300 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (Tabela 7). Embora os teores de P no solo já estivessem altos em 2007 (CFSEMG, 1999), nesta área, as plantas, provavelmente, produziram mais que a área sob adubação convencional, devido à aplicação dos fertilizantes fosfatados. Observa-se, ainda, que, mesmo após a colheita, os teores de P disponível por Mehlich-1 e resina de troca iônica tiveram um incremento expressivo, na camada de 0 a 10cm, de 2007 para o ano de 2008, mostrando também que o cafeeiro não consegue aproveitar toda a quantidade de P aplicada ao

**TABELA 7** Teores de fósforo lábil, moderadamente-lábil, pouco lábil, P- $\Sigma$  (Hedley) e P total recuperado (Bowman, 1989), em três profundidades, num Argissolo Vermelho distrófico (LVd) típico de Cabo Verde, MG, em função da aplicação de fósforo.

Áreas	Ano de 2007			Ano de 2008		
	Profundidades (cm)			Profundidades (cm)		
	0 a 10	10 a 20	20 a 40	0 a 10	10 a 20	20 a 40
	<b>P-Mehlich-1* (mg dm<sup>-3</sup>)</b>			<b>P-Mehlich-1 (mg dm<sup>-3</sup>)</b>		
Área adjacente	0,9	0,5	0,4			
Convencional	5,5A	1,1B	1,5B	4,5A	3,3A	1,4A
300 kg ha <sup>-1</sup> P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	33,2A	5,5B	3,5B	72,1A	8,3B	9,1B
	<b>P-resina* (mg dm<sup>-3</sup>)</b>			<b>P-resina (mg dm<sup>-3</sup>)</b>		
Área adjacente	3,7	3,0	2,7			
Convencional	7,5A	2,3B	3,5B	5,1A	0,4A	2,3A
300 kg ha <sup>-1</sup> P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	41,2A	15,6B	4,0C	75,8A	12,0B	14,9B
	<b>P-lábil (mg kg<sup>-1</sup>)</b>			<b>P-lábil (mg kg<sup>-1</sup>)</b>		
Área adjacente	45,8	41,5	23,3			
Convencional	56,5aA	41,78aB	24,1aC	41,7bA	42,5aA	26,23aB
300 kg ha <sup>-1</sup> P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	49,33bA	22,95bB	15,15bC	98,63aA	38,0aB	32,08aB
	<b>P-moderadamente lábil (mg kg<sup>-1</sup>)</b>			<b>P-moderadamente lábil (mg kg<sup>-1</sup>)</b>		
Área adjacente	267,9	153,8	148,7			
Convencional	235,30bA	209,28aA	155,60aB	304,53bA	178,98aB	109,40bC
300 kg ha <sup>-1</sup> P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	353,63aA	149,90bB	155,10aB	376,23aA	132,80bC	191,83aB
	<b>P-Pouco lábil (mg kg<sup>-1</sup>)</b>			<b>P-Pouco lábil (mg kg<sup>-1</sup>)</b>		
Área adjacente	90,7	75,8	61,2			
Convencional	68,03aB	73,70aA	62,63aB	124,75aA	131,13aA	80,75aB
300 kg ha <sup>-1</sup> P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	69,63aA	52,48bB	47,70bB	118,48aB	134,20aA	99,98aC
	<b>P-<math>\Sigma</math> (Hedley) (mg kg<sup>-1</sup>)</b>			<b>P-<math>\Sigma</math> (Hedley) (mg kg<sup>-1</sup>)</b>		
Área adjacente	404,4	300,9	263,0			
Convencional	359,85bA	324,75aB	242,33aC	471,00bA	352,60aB	216,35bC
300 kg ha <sup>-1</sup> P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	472,58aA	225,33bB	217,93aB	593,33aA	305,00bB	323,85aB
	<b>Ptotal Bowman (mg kg<sup>-1</sup>)</b>			<b>Ptotal Bowman (mg kg<sup>-1</sup>)</b>		
Área adjacente	507,6	440,2	377,7			
Convencional	692,40bA	411,33bB	390,15aB	656,08bA	396,53aB	292,88bC
300 kg ha <sup>-1</sup> P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	778,35aA	471,35aB	330,60bC	1108,40aA	422,20aB	396,58aB

Médias seguidas por letras iguais, minúsculas nas colunas e maiúsculas nas linhas não diferem entre si, a 5%, pelo teste de Scott-Knott. \*Os dados referentes aos extratores de rotina não podem ser comparados entre as áreas, pois não atenderam aos critérios estatísticos do teste de F máximo para análise conjunta dos dados.

solo, mesmo sob maiores produções.

É interessante ressaltar que, apesar de os teores de P disponível pelos extratores de rotina tenderem a aumentar de um ano para o outro, na área em que foram aplicados 300 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, os valores de pH do solo encontram-se abaixo da faixa de maior solubilidade dos compostos fosfatados (Tabelas 1 e 2) (Lindsay et al., 1989; Malavolta, 2006).

Os resultados obtidos pelo fracionamento de P (Hedley et al., 1982) mostram que, geralmente, os teores do nutriente, em todas as frações determinadas nos dois anos de estudo, na camada de 0 a 10cm, foram maiores para a área que recebeu 300 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, exceto o P-lábil em 2007 (Tabela 7).

O maior incremento no teor de P das frações da área que recebeu 300 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> já era esperado, em função da diferença da adubação fosfatada entre as áreas. Os menores teores de P-lábil em 2007 para esta área que recebeu grande incremento de P podem ser atribuídos à maior produtividade obtida na safra de 2006, conforme relatado anteriormente. Já no ano de 2008, a fração P-lábil desta área foi superior e, assim, passou a comportar-se de maneira semelhante às demais frações.

A fração P-pouco lábil também apresentou comportamento diferente das demais nos dois anos, uma vez que seus teores não diferiram entre as áreas estudadas na camada de 0 a 10cm, apesar de haver aumentos dos teores de P de 2007 para o ano de 2008. Aumentos nos teores de P deste compartimento não eram esperados para a área convencional e, possivelmente, estão relacionados a transformações de frações menos lábeis que, nesta ocasião, poderiam atuar como fonte do nutriente (Rheinheimer et al., 2008). Comportamento semelhante foi

observado para a fração P- $\Sigma$  (Hedley), ou P-biodisponível, que também aumenta de um ano para o outro, independentemente da quantidade de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> aplicada (Tabela 7).

Entre as frações componentes do P- $\Sigma$  (Hedley), o P-moderadamente lábil foi aquele compartimento que acumulou as maiores quantidades de P, independente da quantidade do nutriente adicionada ao solo (Tabelas 8 e 9). Evidencia-se, assim, que parte do P está concentrando-se nesta fração, com possibilidade de ainda ser aproveitado pelas plantas de café nos próximos ciclos produtivos (Conte et al., 2003; Santos, 2008), pois, provavelmente, ainda se encontra em equilíbrio com a solução do solo (Novais & Smith, 1999).

Com relação ao compartimento de P<sub>total</sub> Bowman, a área que teve maior incremento de P apresentou os maiores teores em praticamente todas as áreas avaliadas. Observa-se que houve um incremento muito expressivo dos teores desse compartimento na área que recebeu 300 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, na camada de 0 a 10cm, de 2007 para 2008 (Tabela 7). Assim, ao estimar a fração P-residual por meio da diferença entre o P<sub>total</sub> Bowman e o P- $\Sigma$  (Hedley), constatou-se que este compartimento de P-não lábil é maior para a área em que houve grande adição de P, tanto em valores absolutos como em valores relativos (Tabelas 8 e 9). Este comportamento pode ser explicado pelo fato de as frações de P menos lábeis poderem atuar como fonte ou dreno do P-disponível (Rheinheimer et al., 2008).

Observa-se que, quando a quantidade de P adicionada ao cultivo é muito maior que aquela exportada, a porção remanescente é estabilizada em formas de labilidade intermediária ou mesmo baixa, atuando então

como dreno. Em contrapartida, quando a adição de fertilizante não atende à demanda de P no sistema, as frações de labilidade intermediária atuam

**TABELA 8** Frações de fósforo em um Argissolo Vermelho distrófico típico (LVd) de Cabo Verde, MG, cultivado com cafeeiros submetidos a doses de P em áreas com adubação convencional, 300 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e área adjacente, no ano 2007.

Frações de fósforo no solo	Adubação convencional	300 kg ha <sup>-1</sup> de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Área adjacente
	Teores de P (mg kg <sup>-1</sup> )		
<b>Profundidade 0 a 10cm</b>			
<b>P-lábil</b>	56,5 (8%)*	49,3 (6%)	45,8 (9%)
<b>P-moderadamente lábil</b>	235,3 (34%)	353,6 (45%)	267,9 (53%)
<b>P-pouco lábil</b>	68,0 (10%)	69,6 (9%)	90,7 (18%)
<b>P-Σ (Hedley)</b>	359,8 (52,0%)	472,6 (61%)	404,4 (80%)
<b>Ptotal Bowman</b>	692,4 (100%)	778,4 (100%)	507,6 (100%)
<b>P-residual em Bowman</b>	332,6 (48%)	305,8 (39%)	103,2 (20%)
<b>Profundidade 10 a 20cm</b>			
<b>P-lábil</b>	41,8 (11%)	23,0 (5%)	41,5 (9%)
<b>P-moderadamente lábil</b>	209,3 (54%)	149,9 (32%)	183,6 (42%)
<b>P-pouco lábil</b>	73,7 (19%)	52,5 (11%)	75,8 (17%)
<b>P-Σ (Hedley)</b>	324,7 (83%)	225,3 (48%)	300,9 (68%)
<b>Ptotal Bowman</b>	390,1 (100%)	471,4 (100%)	440,2 (100%)
<b>P-residual em Bowman</b>	65,4 (17%)	246,0 (52%)	139,4 (32%)
<b>Profundidade 20 a 40cm</b>			
<b>P-lábil</b>	24,1 (6%)	15,1 (5%)	23,3 (6%)
<b>P-moderadamente lábil</b>	155,6 (38%)	155,1 (47%)	178,5 (46%)
<b>P-pouco lábil</b>	62,6 (15%)	47,7 (14%)	61,2 (16%)
<b>P-Σ (Hedley)</b>	242,3 (59%)	217,9 (66%)	263,0 (68%)
<b>Ptotal Bowman</b>	411,3 (100%)	330,6 (100%)	385,7 (100%)
<b>P-residual em Bowman</b>	169,0 (41%)	112,7 (34%)	122,7 (32%)

P-lábil = Pi + Po NaHCO<sub>3</sub> 0,5 M; P-moderadamente lábil = Pi + Po NaOH 0,1 M; P-pouco lábil = Pi + Po NaOH 0,5 M; Σ – Hedley = P-lábil + P-moderadamente lábil + P-pouco lábil; P total Bowman= P determinado conforme (Bowman, 1989); P-residual em Bowman= Ptotal Bowman - P-Σ (Hedley). \* Valores entre parênteses são os percentuais relativos ao Ptotal Bowman.

**TABELA 9** Frações de fósforo em um Argissolo Vermelho distrófico típico (LVd) de Cabo Verde, MG, cultivado com cafeeiros submetidos a doses de P, em áreas com adubação convencional, 300 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, ano 2008.

Frações de fósforo no solo	Adubação convencional 300 kg ha <sup>-1</sup> de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	
	Teor de P (mg kg <sup>-1</sup> )	
	Profundidade 0 a 10cm	
<b>P-lábil</b>	41,7 (6%)*	98,6 (9%)
<b>P-moderadamente lábil</b>	304,5 (46%)	376,2 (34%)
<b>P-pouco lábil</b>	124,7 (19%)	118,5 (11%)
<b>P-Σ (Hedley)</b>	471,0 (72%)	593,3 (54%)
<b>Ptotal Bowman</b>	656,1 (100%)	1108,4 (100%)
<b>P-residual em Bowman</b>	185,1 (28%)	515,1 (46%)
	Profundidade 10 a 20cm	
<b>P-lábil</b>	42,5 (11%)	38,0 (9%)
<b>P-moderadamente lábil</b>	179,0 (45%)	132,8 (32%)
<b>P-pouco lábil</b>	131,1 (33%)	134,2 (32%)
<b>P-Σ (Hedley)</b>	352,6 (89%)	305,0 (72%)
<b>Ptotal Bowman</b>	396,5 (100%)	422,2 (100%)
<b>P-residual em Bowman</b>	43,9 (11%)	117,2 (28%)
	Profundidade 20 a 40cm	
<b>P-lábil</b>	26,2 (9%)	32,1 (8%)
<b>P-moderadamente lábil</b>	109,4 (37%)	191,8 (48%)
<b>P-pouco lábil</b>	80,7 (28%)	100,0 (25%)
<b>P-Σ (Hedley)</b>	216,4 (74%)	323,9 (82%)
<b>Ptotal Bowman</b>	292,9 (100%)	396,6 (100%)
<b>P-residual em Bowman</b>	76,5 (26%)	72,7 (18%)

P-lábil = Pi + Po NaHCO<sub>3</sub> 0,5 M; P-moderadamente lábil = Pi + Po NaOH 0,1 M; P-pouco lábil = Pi + Po NaOH 0,5 M; Σ – Hedley = P-lábil + P-moderadamente lábil + P-pouco lábil; P total Bowman= P determinado conforme (Bowman, 1989); P-residual em Bowman= Ptotal Bowman - P-Σ (Hedley). \* Valores entre parêntesis são os percentuais relativos ao Ptotal Bowman.

como fonte, mantendo os teores de P na solução do solo (Rheinheimer et al., 2008). Ressalta-se, ainda, que o aumento relevante dos teores de P-remanescente neste solo (Tabela 3) mostra que os sítios de adsorção de fósforo estão sendo saturados pelo incremento do nutriente ao sistema



solo-planta e isso, certamente, proporciona maior facilidade da planta em absorver P.

Quando são comparadas as áreas com cafeeiro em relação àquela adjacente, nota-se que, em geral, houve acréscimo nos teores de P em função do preparo e cultivo do solo ao longo dos anos, exceto para a fração P-pouco lábil em 2007 (Tabela 7). Entretanto, em 2008, as áreas cultivadas passaram a ter maiores teores que aquela adjacente neste compartimento. O aumento dos teores de P nas áreas cultivadas ocorre, possivelmente, em função das práticas agrícolas de preparo do solo, que para culturas perenes ocorre apenas uma vez na ocasião do plantio, e também de calagens e adubações fosfatadas ao longo dos ciclos de cultivo do cafeeiro (Santos, 2008).

As diferenças nos teores de P entre as camadas avaliadas confirmam a baixa mobilidade do P no solo (Novais et al., 2007), pois as camadas inferiores apresentaram menores teores de P e a adubação fosfatada acontece sobre a superfície, sem incorporação. A maior parte dos resultados mostra que a camada de 10 a 20cm apresentou menores teores de P para os compartimentos avaliados na área que recebeu  $300 \text{ kg ha}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$ , evidenciando a maior extração do nutriente nesta área, provavelmente devido às maiores produtividades. Apesar de o cafeeiro também nutrir-se de P proveniente da camada de 0 a 10cm, não ocorre depleção perceptível do nutriente nesta camada, pois a fertilização ocorre sobre ela e, mesmo a planta absorvendo o P, a dose aplicada foi maior que a quantidade absorvida. É importante comentar que o cafeeiro consegue absorver nutrientes das três camadas avaliadas, entretanto, a maior concentração de raízes absorventes desta planta, cerca de 60%,

normalmente se encontra na profundidade de 0 a 20cm (Motta et al., 2006).

Alguns estudos mostram que é possível minimizar a fixação de P no solo por meio da substituição dos calcários, corretivos tradicionalmente utilizados na agricultura, pelos silicatos de Ca e Mg (Carvalho et al., 2000; Pozza et al., 2007). Isto porque os ânions  $\text{H}_3\text{SiO}_4^-$  e  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  competem pelos mesmos sítios de adsorção e, se os silicatos forem aplicados anteriormente aos fertilizantes fosfatados, eles podem proporcionar menor fixação de P (Pozza et al., 2007). Segundo estes últimos autores, a disponibilidade de P, por este procedimento, pode ser aumentada em cerca de 40% e assim, poderá haver um decréscimo na dose anual de  $\text{P}_2\text{O}_5$  a ser aplicada embora haja necessidade de mais estudos nesta linha de pesquisa para futuras recomendações.

## 6 CONCLUSÕES

O cafeeiro irrigado mostrou-se responsivo à adubação fosfatada em fase de produção da cultura, obtendo-se ganhos de até 138% de produtividade com a aplicação da maior dose de  $400 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  na safra avaliada.

Os teores foliares do cafeeiro aumentaram com as doses de P e se estabilizaram em torno de  $1,9$  a  $2,0 \text{ g kg}^{-1}$ .

A adição de fósforo ao solo afetou de maneira variável a distribuição das frações de P nas três profundidades avaliadas, promovendo incrementos na maioria das frações de P-biodisponíveis

estudadas. Entretanto, frações consideradas de maior recalcitrância também apresentaram incrementos em seus teores.

O compartimento de P-biodisponível apresentou-se como maior reservatório de P do solo em ambos os experimentos, apesar de o P-residual estimado apresentar valores bastante expressivos na camada de 0 a 10cm de profundidade.

## 7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARAL, A.S.; ANGHINONI, I.; DESCHAMPS, F.C. Resíduos de plantas de cobertura e mobilidade dos produtos da dissolução do calcário aplicado na superfície do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, n. 1, p. 115-123, jan./fev. 2004.

ANTUNES, F.Z. Caracterização climática do Estado de Minas Gerais. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 12, n. 138, p. 9-13, jan. 1986.

BHADORIA, P.S.; STEINGROBE, B.; CLAASSEN, N.; LIEBERSBACH, H. Phosphorus efficiency of wheat and sugar beet seedlings grown in soils with mainly calcium, or iron and aluminum phosphate. **Plant and Soil**. Dordrecht, v. 246, n. 1, p. 41-52, Sept. 2002.

BLAKE, L.; JOHNSTON, A.E.; POULTON, P.R.; GOULDING, K.W.T. Changes in soil phosphorus fractions following positive and negative phosphorus balances for long periods. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 254, p. 245-261, n. 2, July 2003.

BOWMAN, R.A. A sequential extraction procedure with concentrated sulfuric acid and dilute base for soil organic phosphorus. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 53, n.2, p. 362-366, Mar./Apr. 1989.

CARVALHO, R.; FURTINI NETO, A.E.; CURI, N.; FERNANDES, L.A.; OLIVEIRA JUNIOR, A.C. Dessorção de fósforo por silício em solos cultivados com eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 24, n.1, p. 69-74, jan./mar. 2000.

CERETTA, C.A.; BASSO, C.J.; VIEIRA, F.C.B.; HERBES, M.G.; MOREIRA, I.C.L.; BERWANGER, A.L. Dejeito líquido de suínos: I - perdas de nitrogênio e fósforo na solução escoada na superfície do solo, sob plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.35, n.6, p.1296-1304, nov./dez. 2005.

COMISSÃO DE FERTILIDADE DE SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, MG, 1999. p. 289-302.

CONTE, E.; ANGHINONI, I; RHEINHEIMER, D.S. Frações de fósforo acumuladas em latossolo argiloso pela aplicação de fosfato no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.27, n. 5, p. 893-900, set./out. 2003.

DYNIA, J.F.; CAMARGO, O.A. Effects of liming, green manuring, and phosphate addition on electrochemical attributes of an Oxisol from central Brazil. **Communication in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.29, n.5-6, p.755-762, Mar. 1998.

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

FERNÁNDEZ R., I.E.; NOVAIS, R.F.; NUNES, F.N.; KER, J.C. Reversibilidade de fósforo não-lábil em solos submetidos à redução microbiana e química. II – Extrações sucessivas do fósforo pela resina de troca aniônica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.32, n. 6, p. 2319-2330, nov./dez. 2008.

FERREIRA, D.F. Análises estatísticas por meio do SISVAR para Windows versão 4.0. In: REUNIÃO ANUAL DA REGIÃO BRASILEIRA DA SOCIEDADE INTERNACIONAL DE BIOMETRIA, 45., 2000, São Carlos. **Programas e Resumos...**São Carlos: UFSCar, 2000. p. 235.

GALLO, P.B.; RAIJ, B.van; QUAGGIO, J.A.; PEREIRA, L.C.E. Resposta de cafezais adensados à adubação NPK. **Bragantia**, Campinas, v.58, n.2, p.341-351, 1999.

GATIBONI, L.C.; KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D.S.; FLORES, J.P.C. Biodisponibilidade de formas de fósforo acumuladas em solo sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.31, n. 4, p. 691-699, jul./ago. 2007.

GUERRA, A.F.; ROCHA, O.C.; RODRIGUES, G.C.; SANZONOWICZ, C.; RIBEIRO FILHO, G.C.; TOLEDO, P.M.R.; RIBEIRO, L.F. Sistema de produção de café irrigado: um novo enfoque. **ITEM**, Brasília, n.73, p. 52-61, 2007.

GUERRA, A.F.; ROCHA, O.C.; RODRIGUES, G.C.; SANZONOWICZ, C. Manejo da irrigação do cafeeiro, com estresse hídrico controlado, para uniformização de florada. In.: ZAMBOLIM, L. (Ed.). **Boas práticas agrícolas na produção de café**. Viçosa, MG: UFV, 2006.

GUERRA, A.F.; RODRIGUES, G.C.; ROCHA, O.C.; SANZONOWICZ, C.; RIBEIRO FILHO, G.C. Resposta do cafeeiro arabica a aplicação de fósforo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA EM CAFEICULTURA IRRIGADA, 10., 2008, Araguari. **Resumos Expandidos...** Araguari: Embrapa Café, 2008. p- 62-66.

HEDLEY, M. J.; STEWARD, W. B.; CHAUHAN, B. S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fraction induced by cultivation practices and laboratory incubation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 46, n. 5, p. 970-976, Sept./Oct. 1982.

LAVIOLA, B.G.; MARTINEZ, E.M.P.; SOUZA, R.B.; ALVAREZ V., V.H. Dinâmica de P e S em folhas, flores e frutos de cafeeiro arábico em três níveis de adubação. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v.23, n.1, p.29-40, jan./mar. 2007.

LIMA, J.M.; ANDERSON, S.J.; CURTI, N. Phosphate-Induced Clay Dispersion as Related to Aggregate Size and Composition in Hapludoxs. **Soil Science Society of America Journal**, v.64, n.3, p.895-897, May 2000.

LINDSAY, W.L.; VLEK, P.L.G.; CHIEN, S.H. Phosphate Minerals. In: DIXON, J.B.; WEED, S.B. (Ed.). **Minerals in soil environments**. 2.ed. Madison: SSSA, 1989. p. 1089-1131. (SSSA, Book Series, 1).

LOPES, A. S. **Solos sob cerrado**: características, propriedades e manejo. Piracicaba: Instituto da Potassa e Fosfato, 1983. 162 p.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006. 631 p.

MALAVOLTA, E. Nutrição, adubação e calagem para o cafeeiro. In: RENA, A.B.; MALAVOLTA, E.; ROCHA, M.; YAMADA, T. (Ed.). **Cultura do cafeeiro**: fatores que afetam a produtividade. Piracicaba: Potafos, 1986. p. 136-274.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas**: princípios e aplicações. 2.ed. Piracicaba: Potafos, 1997. 319p.

MARTINEZ, H.E.P.; SOUZA, R.B.; ALVAREZ V., V.H.; MENEZES, J.F.S.; NEVES, Y.P.; OLIVEIRA, J.A.; ALVARENGA, A.P.; GUIMARÃES, P.T.G. **Nutrição mineral, fertilidade do solo e produtividade do cafeeiro nas regiões de Patrocínio, Manhuaçu, Viçosa, São Sebastião do Paraíso e Guaxupé**. Belo Horizonte: Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais, 2004. (Boletim Técnico, 72).

MEHRA, O.P.; JACKSON, M.L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. **Clays and Clay Minerals**, Clarkson, v.7, n.2, p.317-327, 1960.

MOTTA, A.C.V. ;NICK, J.A.; YORINORI, G.T.; SERRAT, B.M. Distribuição horizontal e vertical da fertilidade do solo e das raízes de cafeeiro (*Coffea arabica* L.) cultivar Catuaí. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v.28, n.4, p.455-463, oct./dec. 2006.

MURPHY, J.; RILEY, J.P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Analítica Chimica Acta**, Amsterdam, v.27, n.1, p.31-36, 1962.

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

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J.; NUNES, F.N. Fósforo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: SBCS, 2007. 471-550p.

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

POZZA, A.A.A.; CURI, N.; COSTA, E.T.S.; GUILHERME, L.R.G.; MARQUES, J.J.G.S.M.; MOTTA, P.E.F. Retenção e dessorção competitivas de ânions inorgânicos em gibbsita natural de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.42, n.11, p.1627-1633, nov. 2007.

PREZOTTI, L.C.; ROCHA, A.C. Nutrição do cafeeiro arábica em função da densidade de plantas e da fertilização com NPK. **Bragantia**, Campinas, v.63, n.2, p.239-251, maio/ago. 2004.

RAIJ, B. van. Fósforo no solo e interação com outros elementos. In: YAMADA, T; ABDALLA, S.R.S. (Ed.). **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: Potafos/Anda, 2004. p. 107-116.

RAIJ, B. van.; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA.H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais.** Campinas, Instituto Agronômico, 2001. 285p.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo.** Campinas: Instituto Agronômico/Fundação IAC, 1997. 285p (Boletim Técnico, 100).

RAIJ, B.van.; QUAGGIO, J.A.; CANTARELLA, H. **Análise química do solo para fins de fertilidade.** Campinas: Fundação Cargil, 1987. 107p.

RESENDE, M.; BAHIA FILHO, A.F.C.; BRAGA, J.M. Mineralogia da argila de Latossolos estimada por alocação a partir do teor total de óxidos do ataque sulfúrico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.11, n.1, p. 17-23, jan./abr. 1987.

RESENDE, M.; CURI, N.; LANI, J. L. Reflexões sobre os solos brasileiros. In: ALVAREZ V., V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R.; BARROS, N.F.; MELLO, J.W.V.; COSTA, L.M. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo.** Viçosa, MG: SBCS, 2002. v.1, p. 593-645.

RHEINHEIMER, D.S.; ANGHINONI, I.; KAMINSKI, J. Depleção do fósforo inorgânico de diferentes frações provocada pela extração sucessiva com resina em diferentes solos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.24, n. 2, p. 345-354, abr./jun. 2000.

RHEINHEIMER, D.S.; GATIBONI, L.C.; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema de plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 2, p. 576-586, mar./abr. 2008.

SANTOS, J.Z.L. **Adubação fosfatada, frações de fósforo e resposta do feijoeiro, em latossolos de cerrado, com diferentes textura, mineralogia e histórico de uso.** 2008. 87p. (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.



SILVA, M.A.; NOBREGA, J.C.A.; CURI, N.; SIQUEIRA, J.O.; MARQUES, J.J.G.S.M; MOTTA, P.E.F. Frações de fósforo em latossolos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.38, n.10, p. 1197-1207, out. 2003.

SOUSA, D.M.G. de.; MIRANDA, L.N.; OLIVEIRA, S.A. Acidez do solo e sua correção. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: SBCS, 2007. p. 205-274.

SOUSA, D.M.G. de.; LOBATO, E.; REIN, A.T. Adubação fosfatada. In: SOUSA, D.M.G. de; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2.ed. Brasília: Embrapa Cerrados, 2004. p.147-168.

SYERS, J.K.; BROWMAN, M.G.; SAMILLE, G.W.; COREY, R.B. Phosphate sorption by soils evaluated by the Langmuir adsorption equation. **Soil Science Society America Proceeding**, Madison, v.37, n.3, p.358-363, May/June 1973.

TORRENT, J.; SCHWERTMANN, U.; FETCHER, H.; ALFEREZ, F. Quantitative relationships between soil color and hematite content. **Soil Science**, Baltimore, v.136, n.6, p.354-358, 1983.

VETTORI, L. **Métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura, 1969. (Boletim Técnico, 7).

ZALBA, P.; PEINEMANN, N. Phosphorus content in soil in relation to fulvic acid carbon fraction. **Communication in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.33, n.19-20, p.3737-3744, 2002.

## **CAPÍTULO III**

### **DINÂMICA E DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO NO SOLO SOB CAFEIEIRO: DOSES DE P, MINERALOGIA E FRAÇÕES INORGÂNICAS DE P**

#### **1 RESUMO**

A dinâmica e a disponibilidade do fósforo no solo são influenciadas pelas adubações fosfatadas durante o desenvolvimento dos ciclos de cultivo das plantas. O presente trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar as frações inorgânicas ligadas a Ca, Fe e Al, associando-as à mineralogia do solo. Foram analisados dois experimentos em áreas com cafeeiros em produção: (a) num Latossolo Vermelho distrófico típico (LVd), área irrigada localizada em Planaltina, DF, submetida à adubação fosfatada anual, a partir de 2002, de 0, 50, 100, 200 e 400 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, com três repetições em blocos casualizados; (b) num Argissolo Vermelho distrófico típico (PVd), área de sequeiro localizada em Cabo Verde, Sul de Minas Gerais, em dois talhões: um que recebeu a dose de 300 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, sendo 2/3 como superfosfato simples e 1/3 como termofosfato magnésiano e outro no qual não se utilizou adubo fosfatado no ano agrícola avaliado, sendo as amostras retiradas em blocos casualizados com quatro repetições. Foram determinadas frações de fósforo P-Fe, P-Al e P-Ca nas amostras de solo coletadas nas profundidades 0 a 10, 10 a 20 e 20 a 40cm, conforme a metodologia de Chang & Jackson (1957). Ao aumentar a concentração de P no solo, todas as frações sofrem incrementos, sendo a fração P-Al aquela que apresenta os incrementos mais expressivos. O P aplicado ao solo encontra-se principalmente ligado ao Al e esta é a forma de fósforo no solo que está predominantemente fornecendo o nutriente ao cafeeiro. As frações de P neste trabalho apresentaram a seguinte magnitude: P-Al>P-Fe>P-Ca.

## 2 ABSTRACT

Phosphorus dynamics and availability in soils are influenced by phosphorus fertilizations. The objective of this study was to evaluate the inorganic fractions linked to calcium, iron and aluminum, associating them with soil mineralogy. Two experiments were carried out in two coffee (*Coffea arabica* L.) production areas: (1) in a typical dystrophic Red Latosol (Oxisol), located in an irrigated area in Planaltina, DF, being triple superphosphate annual fertilization of 0, 50, 100, 200 and 400 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> in randomized blocks with three replications; (2) in a typical dystrophic Red Argisol (Ultisol), located in an area without irrigation - Cabo Verde - south of Minas Gerais, in two production areas: one receiving 300 ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, being 2/3 applied as simple superphosphate and 1/3 as magnesium thermophosphate, and another with no P fertilization, in randomized blocks with four replicates. Phosphorus fractions were determined in soil samples collected at three depths 0-10, 10-20 and 20-40cm, according to Chang & Jackson (1957) methodology. Soil P inputs increased all inorganic phosphorus fractions, being the P-Al one which presents the highest increments. The P applied in the soil remains mainly linked to Al and this form is the main source of this nutrient to the coffee plants. The inorganic P fractions presented the following sequence: P-Al > P-Fe > P-Ca.

### 3 INTRODUÇÃO

O cafeeiro (*Coffea arabica* L.) é uma das principais culturas difundidas no Brasil, tendo, além de caráter econômico, alto significado social, pois demanda grande quantidade de mão-de-obra. O País é o maior produtor de café do mundo e também o segundo maior consumidor do produto. Atualmente, possui uma área plantada de, aproximadamente, 2,1 milhões de hectares, responsável por 33,74 milhões de sacas beneficiadas produzidas na safra de 2007/08 e participa com 6,2% das exportações do agronegócio brasileiro. Entretanto, possui baixa média de produtividade, com 16,3 sacas de café beneficiado ha<sup>-1</sup>, neste mesmo ano (Companhia Nacional de Abastecimento - Conab, 2009).

O fósforo é imprescindível ao crescimento e à reprodução das plantas, as quais não alcançam seu máximo potencial produtivo sem um adequado suprimento nutricional (Marschner, 1995). Ele é constituinte de importantes compostos das células vegetais, incluindo fosfato presente nas moléculas de açúcares intermediários da respiração e fotossíntese, bem como dos fosfolipídeos que compõem as membranas vegetais. É, também, componente de nucleotídeos utilizados no metabolismo energético das plantas (Taiz & Zeinger, 2004). Enfim, seu principal papel na planta é o de armazenar e transferir energia (Malavolta, 2006).

Por muitos anos, o cafeeiro foi considerado uma planta que não responde à aplicação de doses de P no solo em sua fase de produção (Bataglia, 2004). A pesquisa, provavelmente, chegou a esta conclusão devido ao fato de o P ser um dos macronutrientes menos exportados pelo cafeeiro (Malavolta, 1986) e, sendo assim, a planta não precisaria de

grande quantidade do nutriente para completar seu ciclo reprodutivo. Além disso, anteriormente, o cafeeiro só era cultivado em solos de média a alta fertilidade e a maioria das fazendas experimentais nas diferentes regiões do mundo situava-se em localidades nessas condições. Entretanto, alguns trabalhos têm mostrado que esta planta consegue responder a incrementos de P, principalmente nos solos de baixa fertilidade como os originalmente sob Cerrado, na fase de implantação da cultura e em anos de alta produtividade (Guimarães, 1986; Gallo et al., 1999; Prezzotti & Rocha, 2004). Resultados recentes de pesquisa mostram respostas do cafeeiro à adubação fosfatada anual de até 400 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (Guerra et al., 2007).

É de grande importância para a cafeicultura o entendimento do comportamento do P no solo sob maiores aplicações do nutriente. Espera-se que as formas inorgânicas de P, após incrementos anuais do nutriente, estejam, em sua maioria, ligadas ao Ca, visto que, em culturas perenes, aplicam-se corretivos e fertilizantes sem haver incorporação. Entretanto, é consenso na literatura que os solos brasileiros são, em sua maioria, ácidos, ricos em óxidos de ferro e alumínio e apresentam compostos de P ligados a Fe, Al e Ca, nessa ordem de preferência (Raij, 2004). Esses compostos possuem diferentes solubilidades no solo e podem ter seu equilíbrio alterado pelo incremento de P nos sistemas de produção. Neste contexto, existe a necessidade de estudos que caracterizem a variação dos mesmos ao longo dos ciclos de cultivo em diferentes solos, com a finalidade de avaliar as principais formas disponíveis do nutriente, a resposta das culturas, o sistema de manejo e o residual da adubação fosfatada no solo.

O fracionamento das formas inorgânicas de P é uma das maneiras de caracterizar o nutriente no solo e, se analisado em conjunto com o P-disponível, obtido pelos extratores de rotina, torna-se uma ferramenta muito útil para o entendimento da dinâmica e da disponibilidade de P para as plantas, permitindo, dessa maneira, auxiliar a recomendação do melhor manejo da adubação fosfatada para o cafeeiro.

Este trabalho foi realizado com o objetivo de quantificar e avaliar a dinâmica e disponibilidade de fósforo em solos sob cafeeiros, submetidos a aplicações anuais de diferentes doses de  $P_2O_5$ , por meio do fracionamento das formas inorgânicas de P ligadas a Ca, Fe e Al, aliado aos principais extratores de rotina utilizados no Brasil.

## **4 MATERIAL E MÉTODOS**

### **4.1 Experimentos**

Para a avaliação dos efeitos das diferentes doses de fósforo sobre a dinâmica e disponibilidade de P em solos sob cultivo de cafeeiros, foram instalados e avaliados dois experimentos, descritos a seguir.

#### **4.1.1 Experimento I**

O experimento foi instalado em janeiro de 2001, num Latossolo Vermelho distrófico típico (LVd) textura muito argilosa, localizado no município de Planaltina, DF, no Centro de Pesquisa Agropecuária do Cerrado – Embrapa/CPAC. A área experimental está localizada nas

coordenadas de 15°35'42" Latitude Sul e 47°43'51" Longitude Oeste, à altitude de 1.009m.

Segundo a classificação de Köppen, o município apresenta clima tropical Aw chuvoso de inverno seco com temperatura média anual de 23°C. O período seco varia de 5 a 6 meses (abril a setembro) e a precipitação média anual é de 1.400mm, concentrada no período de outubro a março.

Foi utilizada a cultivar Rubi MG-1192, no espaçamento de 2,8 x 0,5m, seguindo-se as recomendações de adubação de plantio da Comissão de Fertilidade de Solo do Estado de Minas Gerais - CFSEMG (1999). A partir da primeira florada, em 2002, iniciou-se a aplicação anual de diferentes doses de fósforo (0; 50; 100; 200 e 400 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), na projeção da copa do cafeeiro, utilizando como fonte o superfosfato triplo, aplicando-se 2/3 da dose em setembro, antes do retorno das irrigações após período de estresse hídrico, e 1/3 entre o final de dezembro e início de janeiro. Este parcelamento não é comumente utilizado na cafeicultura, entretanto, são os períodos de maior demanda do nutriente pela planta (Malavolta, 2006). Foi mantida a mesma adubação de produção para os demais nutrientes aplicando-se anualmente 500 kg ha<sup>-1</sup> de N na forma de uréia, 500 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O na forma de cloreto de potássio e 100 kg ha<sup>-1</sup> de FTE BR10 (Zn=7%; B=2,5; Cu=1%; Fe=4%; Mn=4%; Mo=0,1%; Co=0,1%) para suprimento de micronutrientes. O N e o K foram parcelados em 4 aplicações de setembro a fevereiro e o tratamento fitossanitário, quando necessário, foi igual para todas as parcelas. O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com três repetições, em que os blocos foram constituídos de três linhas de plantio,

sendo a linha central considerada útil e ambas as laterais bordaduras. As parcelas foram constituídas de 10 plantas, sendo as 8 centrais úteis. A área foi irrigada por pivô central, num regime de estresse hídrico moderado conforme Guerra et al. (2006) para sincronização do desenvolvimento de gemas reprodutivas e uniformização da florada.

Em 2005, as plantas do experimento foram podadas, sofrendo um esqueletamento a 0,4m do ramo ortotrópico e um decote a 1,5m de altura. Nas parcelas experimentais, no ano de 2007, foram coletadas amostras de solo em três profundidades 0 a 10, 10 a 20 e 20 a 40cm, antes das adubações para o ano agrícola 2007/2008. As amostras foram retiradas utilizando-se trado. Para cada profundidade foram retiradas amostras compostas em pontos diferentes, respeitando-se, assim, a independência das camadas. No ano de 2008, na ocasião da colheita, retiraram-se novamente amostras nessas parcelas, seguindo-se os mesmos procedimentos do ano anterior.

#### **4.1.2 Experimento II**

O experimento foi conduzido a partir de julho de 2007, na Fazenda Santo Antônio, município de Cabo Verde, MG, região Sul de Minas, num Argissolo Vermelho distrófico típico (PVD) textura muito argilosa.

Segundo a classificação de Köppen, o município de Cabo Verde apresenta clima tipo Cwb temperado chuvoso ou subtropical de altitude, com temperatura média anual de 18,2°C e precipitação média anual de 1.600 mm (Antunes, 1986). O ensaio foi instalado em duas áreas sob as coordenadas geográficas de 21°28'37" Latitude Sul e 46°21'57" Longitude Oeste, à altitude de 902m.



Utilizou-se uma lavoura em produção, cultivar Icatu amarelo IAC 3282, plantada em 2002, num espaçamento de 2,5 x 0,5m, em uma área conduzida sob adubação convencional, onde não se aplicava qualquer fertilizante fosfatado desde 2004 quando foram aplicados 126 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> como superfosfato simples (18% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). Numa segunda área, aplicaram-se 300 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> em 2007, sendo 2/3 na forma de superfosfato simples (18% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) e 1/3 na forma de termofosfato magnésiano (18% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). Essa área também recebeu 300 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> no ano de 2006, da mesma forma que em 2007. As adubações com os demais nutrientes, para ambas as áreas, seguiram as recomendações de Raij et al. (1997). Numa área adjacente, não cultivada e sob vegetação de *Brachiaria*, também foram retiradas amostras de solo, com a finalidade de ser utilizada como referência no estudo.

Os ensaios foram instalados em blocos casualizados com quatro repetições. Coletaram-se amostras de solo nas camadas de 0 a 10; 10 a 20 e 20 a 40 cm de profundidade em 2007, antes da adubação para o ano agrícola 2007/2008 e, em 2008, no momento da colheita, respeitando-se a independência entre as camadas.

#### **4.2 Análises laboratoriais**

Todas as amostras dos materiais de solo dos dois experimentos, tanto por ocasião do início do ensaio (Tabela 1) como posteriormente, foram analisadas nos laboratórios do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras, onde foram caracterizadas química, física e mineralogicamente. Após secagem ao ar, os solos foram passados em peneira de 2 mm, sendo as análises químicas (pH em água, K, Ca,

Mg, Al, H + Al, P e carbono orgânico) realizadas conforme Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa (1997).

**TABELA 1** Atributos químicos, físicos e mineralógicos\* originais dos solos, LVd de Planaltina, DF, e PVd de Cabo Verde, MG, nas profundidades 0 a 10, 10 a 20 e 20 a 40cm, por ocasião do início do estudo, em julho de 2007.

Atributos do solo	LVd**			PVd		
	Profundidades (cm)			Profundidades (cm)		
	0 a 10	10 a 20	20 a 40	0 a 10	10 a 20	20 a 40
pH (água)	4,8	4,8	4,5	4,9	4,9	4,8
K (mg dm <sup>-3</sup> )	140	126	91	64	34	31
Ca (cmo <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,0	1,2	0,6	0,3	0,1	0,2
Mg (cmo <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,3	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1
Al (cmo <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,0	0,9	1,0	1,6	1,4	1,2
H + Al (cmo <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	10,4	8,6	8,6	8,4	6,9	6,1
m (%)	40	41	51	69	82	75
Matéria Orgânica (g kg <sup>-1</sup> )	39	33	26	30	21	12
P-Mehlich-1 (mg dm <sup>-3</sup> )	3,3	1,4	1,1	0,9	0,5	0,4
P-resina (mg dm <sup>-3</sup> )	3,9	1,1	2,8	3,7	3,0	2,1
P-remanescente (mg kg <sup>-1</sup> )	4,5	4,3	4,2	9,6	6,8	4,6
Areia (g kg <sup>-1</sup> )	18	18	18	24	24	22
Silte (g kg <sup>-1</sup> )	14	14	10	15	10	14
Argila (g kg <sup>-1</sup> )	68	68	72	61	66	64
	<b>0 a 40cm</b>					
CMAP <sup>1</sup> (mg kg <sup>-1</sup> )	1187			914		
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> "total" (g kg <sup>-1</sup> )	0,5			1,49		
Fe <sub>d</sub> (g kg <sup>-1</sup> )	97,5			83,3		
Fe <sub>o</sub> (g kg <sup>-1</sup> )	1,43			1,08		
Fe <sub>o</sub> / Fe <sub>d</sub>	0,015			0,013		
Caulinita (Ct) (g kg <sup>-1</sup> )	370			410		
Gibbsita (Gb) (g kg <sup>-1</sup> )	270			240		
Gb / (Gb + Ct)	0,42			0,37		
Hematita (Hm) (g kg <sup>-1</sup> )	13			12		
Goethita (Gt) (g kg <sup>-1</sup> )	84			72		
Gt / (Gt + Hm)	0,87			0,86		

\* As análises mineralógicas, CMAP e P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> "total" foram feitas para amostras coletadas a 0 a 40cm;

\*\* Para este solo, as análises referem-se ao tratamento correspondente a 0 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>;

<sup>1</sup> Capacidade Máxima de Adsorção de Fósforo. Fe<sub>d</sub>=ferro livre; Fe<sub>o</sub>=ferro menos cristalino.

Para a caracterização mineralógica dos solos, utilizaram-se amostras de 0 a 40cm de profundidade. Os teores de óxidos de Fe livres totais foram obtidos por meio de quatro extrações sucessivas com ditionito-citrato-bicarbonato de sódio ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ); os teores de óxidos de ferro menos cristalinos por uma extração com oxalato (Mehra & Jackson, 1960) e os teores de óxidos do ataque sulfúrico, determinados conforme Vettori (1969) com modificações de Embrapa (1997). Os teores de caulinita e gibbsita foram estimados por alocação (Resende et al., 1987) e os de hematita e goethita, baseando-se na cor do solo e nos teores de  $\text{Fe}_d$  (Torrent et al., 1983). A capacidade máxima de adsorção de P (CMAF) foi estimada conforme Syers et al. (1973). Na análise física foi determinada a granulometria da TFSA, pelo método da pipeta (EMBRAPA, 1997).

A disponibilidade de P foi avaliada pelos extratores de Mehlich-1 ( $\text{HCl } 0,05 \text{ mol L}^{-1} + \text{H}_2\text{SO}_4 \text{ } 0,0125 \text{ mol L}^{-1}$ ) (EMBRAPA, 1997) e pela resina de troca iônica (Raij et al., 1987). Também foram determinadas frações de P segundo de Chang & Jackson (1957). Nesse fracionamento, foram separadas as formas de P ligadas a Al (P-Al), extraídas com  $\text{NH}_4\text{F } 0,5 \text{ mol L}^{-1}$  a pH 8,2; P ligado a Fe (P-Fe), extraído com  $\text{NaOH } 0,1 \text{ mol L}^{-1}$  e P ligado a Ca (P-Ca), extraído com  $\text{H}_2\text{SO}_4 \text{ } 0,25 \text{ mol L}^{-1}$ . Após cada extração, o solo residual foi centrifugado duas vezes com NaCl saturado ( $360 \text{ g L}^{-1} \text{ NaCl}$ ), descartando-se o sobrenadante. O P foi determinado por colorimetria em todos os extratos, segundo Murphy & Riley (1962).

### **4.3 Análises estatísticas**

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e testes de média (Skott-Knott, 5%), para avaliar as diferenças entre os tratamentos. No experimento I, foram ajustadas equações de regressão para as diferentes frações relativas de P como variáveis dependentes das doses de  $P_2O_5$ . No experimento II, utilizou-se a análise de variância conjunta para estudo das variáveis resposta. Todas as análises foram realizadas utilizando-se o programa estatístico Sisvar (Ferreira, 2000). Também foram realizadas correlações simples, por meio de coeficientes de Pearson, determinadas para a relação entre as diferentes formas P.

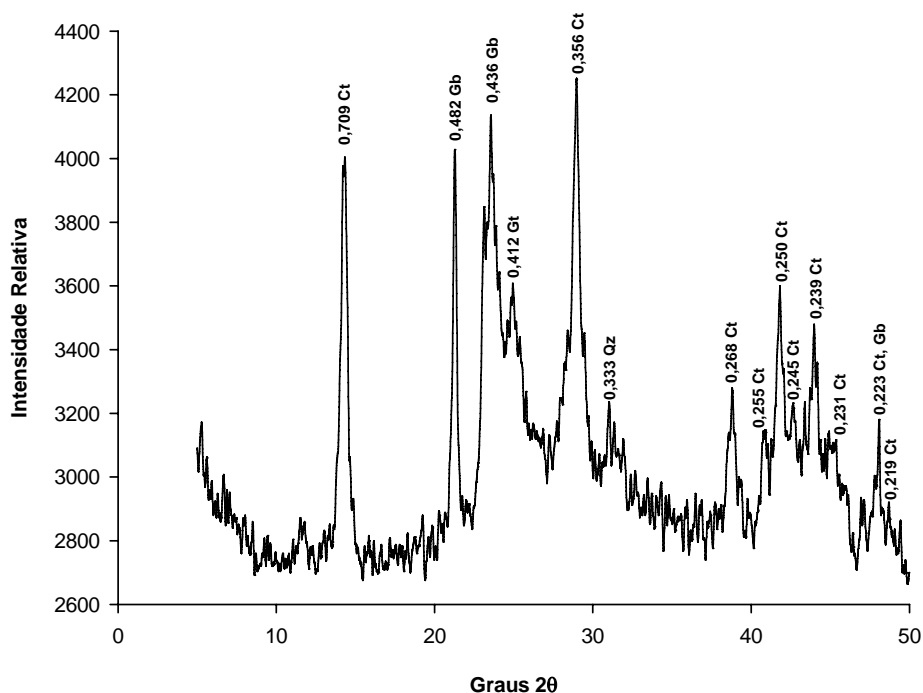
## **5 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **5.1 Mineralogia dos solos**

Por meio dos difratogramas de raios X da fração argila (Figuras 1 e 2) foram identificados caulinita, gibbsita, goethita e quartzo. Ressalta-se que, para o Latossolo, os picos de caulinita são mais estreitos (menor largura à meia-altura) quando comparados ao Argissolo, indicando maior grau de cristalinidade deste argilomineral naquele solo.

As dissoluções seletivas com ditionito-citrato-bicarbonato de sódio ( $Fe_d$ ) e oxalato ácido de amônio ( $Fe_o$ ) indicam que a maior parte dos óxidos de Fe apresenta elevado grau de cristalinidade, normalmente encontrado em solos tropicais (Motta et al., 2002). Contudo, analisando-se os dados da Tabela 1, observa-se que o LVd possui maior relação  $Fe_o/Fe_d$  em comparação ao PVd. Esta maior taxa pode ser explicada pelo

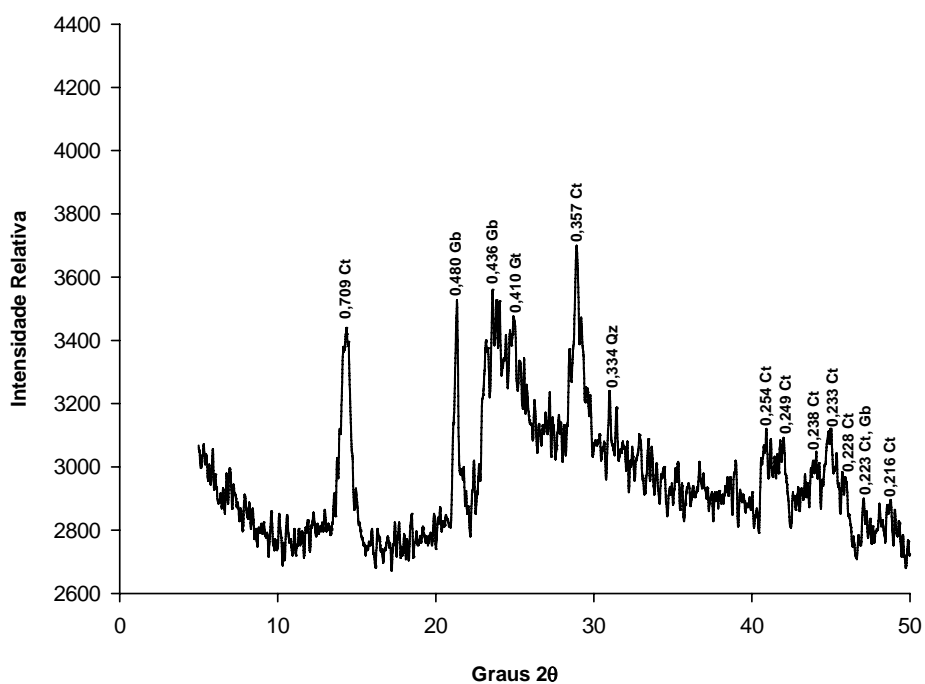
fato de o LVd possuir maiores teores de matéria orgânica (Kämpf & Curi, 2000).



**FIGURA 1** Difratogramas de raios-X da fração argila saturada com  $\text{Na}^+$  da camada de 0 a 40cm do Latossolo Vermelho distrófico típico (LVd) de Planaltina, DF,. Ct: caulinita; Gb: gibbsita; Gt: goethita; Qz: quartzo. Números representam espaçamento d, em nm.

Os maiores valores de  $\text{Fe}_d$ , de goethita, da relação  $\text{Gt}/(\text{Gt} + \text{Hm})$  e de argila do LVd ajudam a explicar sua maior CMAP e seus menores valores de P-remanescente (Eberhardt et al., 2008). Quanto à contribuição dos minerais na CMAP do solo, eles tendem a apresentar a seguinte ordem decrescente: goethita>hematita>caulinita>gibbsita (Resende et al.,

1988). Apesar de a goethita ser mais reativa com os fosfatos quando comparada à gibbsita, esta última tem sido considerada como o mineral de argila que restringe com maior intensidade a dessorção de P no solo (Fernández R. et al., 2008).

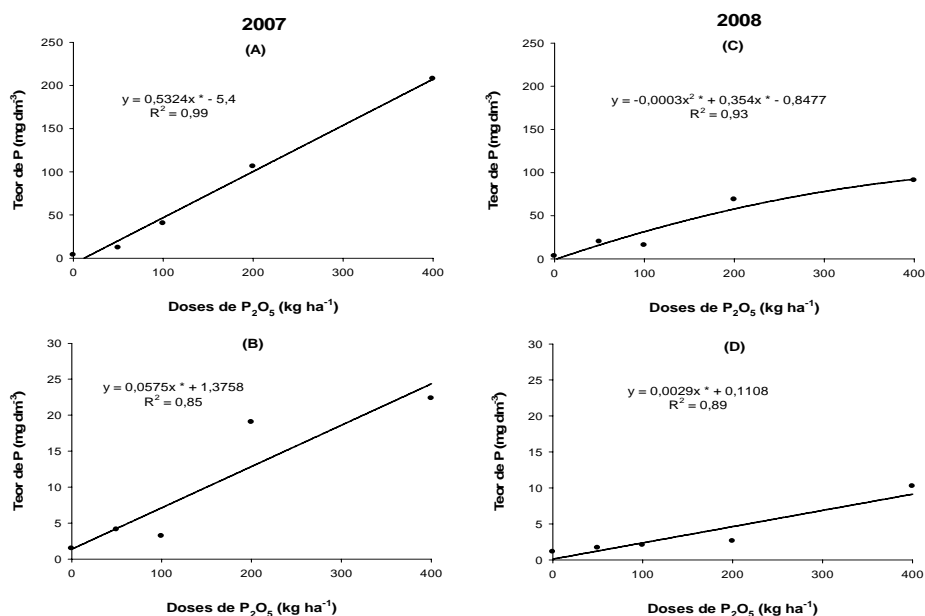


**FIGURA 2** Difractogramas de raios X da fração argila saturada com Na<sup>+</sup> da camada de 0 a 40cm do Argissolo Vermelho distrófico típico (Pvd) de Cabo Verde, MG. Ct: caulinita; Gb: gibbsita; Gt: goethita; Qz: quartzo. Números representam espaçamento d em nm.

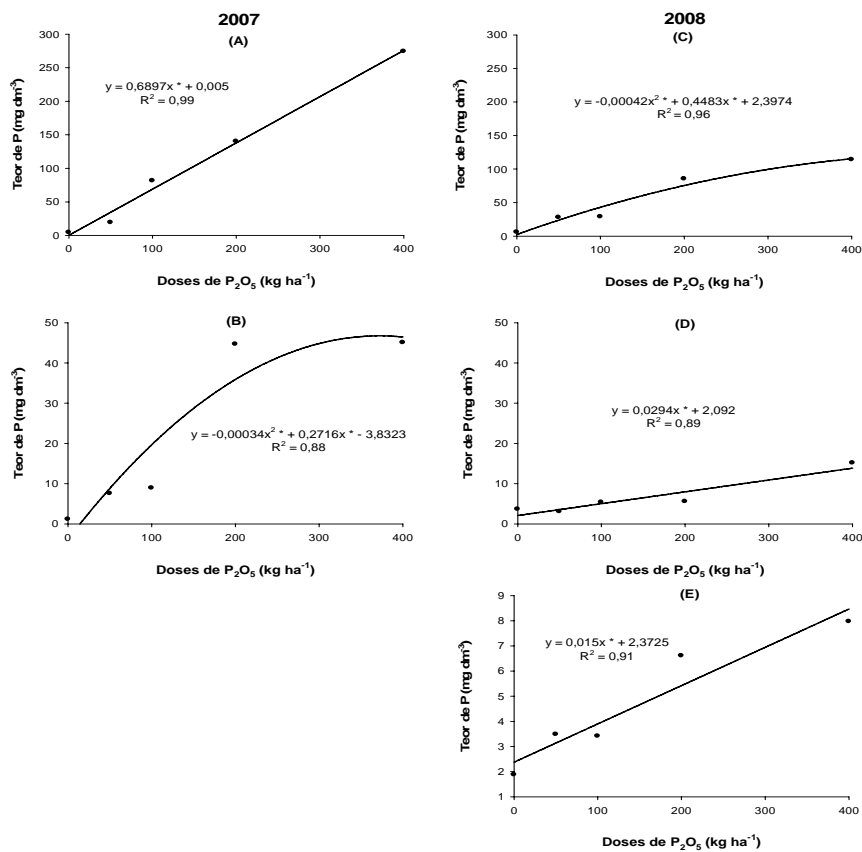
## 5.2 Experimento I

### 5.2.1 Formas de P no solo

Observou-se um comportamento semelhante quanto aos teores de P obtidos pelos extratores de rotina (Figura 3 e 4) e aqueles obtidos pelo fracionamento (Tabela 2), os quais apresentaram aumentos em função do acréscimo das doses de  $P_2O_5$  aplicadas ao longo dos anos avaliados, nos anos de 2007 e 2008. Destaca-se que os maiores teores de P-disponível foram obtidos nas camadas de 0 a 10cm, nos dois anos avaliados, devido



**FIGURA 3** Teores de fósforo disponível pelo extrator de Mehlich-1 no solo, em diferentes profundidades num LVd de Planaltina, DF, em função da aplicação anual de doses de fósforo, em amostras coletadas em dois anos (A e B = camadas de 0 a 10 e 10 a 20cm, respectivamente, no ano de 2007; C e D = camadas de 0 a 10 e 10 a 20cm, respectivamente, no ano de 2008). \* Significativo, pelo teste de t, a 5%.



**FIGURA 4** Teores de fósforo disponível pela resina de troca iônica, em diferentes profundidades num LVd de Planaltina, DF, em função da aplicação anual de doses de fósforo, em amostras coletadas em dois anos (A e B = camadas 0 a 10 e 10 a 20cm, respectivamente, no ano 2007; C, D e E = camadas 0 a 10, 10 a 20 e 20 a 40cm, respectivamente, no ano 2008).  
 \* Significativo, pelo teste de t, a 5%.

à baixa mobilidade do nutriente no solo (Novais & Smith, 1999), uma vez que, para o cafeeiro, os fertilizantes são aplicados em superfície e sem incorporação. Os teores de P obtidos nessas camadas pelos extratores de



rotina, de maneira geral, tenderam a diminuir de 2007 para 2008, certamente em virtude das exigências da planta para seu crescimento vegetativo e reprodutivo (Capítulo II). Ajustes lineares foram obtidos nessa camada em todas as formas de P-disponível no ano 2007 (Figura 3A e 4A) e ajustes quadráticos para o ano 2008 (Figura 3C e 4C).

As formas de P das camadas de 10 a 20cm apresentaram ajustes lineares para a maioria dos resultados, exceto para resina de troca iônica em 2007 (Figura 4B). Também houve interação significativa das formas de P das camadas de 20 a 40cm com as doses de  $P_2O_5$  aplicadas para a resina de troca iônica apenas no ano de 2008 (Figura 4E). Uma vez que a adubação fosfatada foi feita em superfície e sem incorporação, as camadas subsuperficiais geralmente apresentaram teores bem menores do que aqueles da camada de 0 a 10cm. Os teores de P dessas camadas, para os extratores de rotina, em geral diminuíram mais abruptamente de 2007 para o ano de 2008, evidenciando extração do nutriente pelas plantas e a não reposição do mesmo tão rapidamente como ocorre na camada de 0 a 10cm.

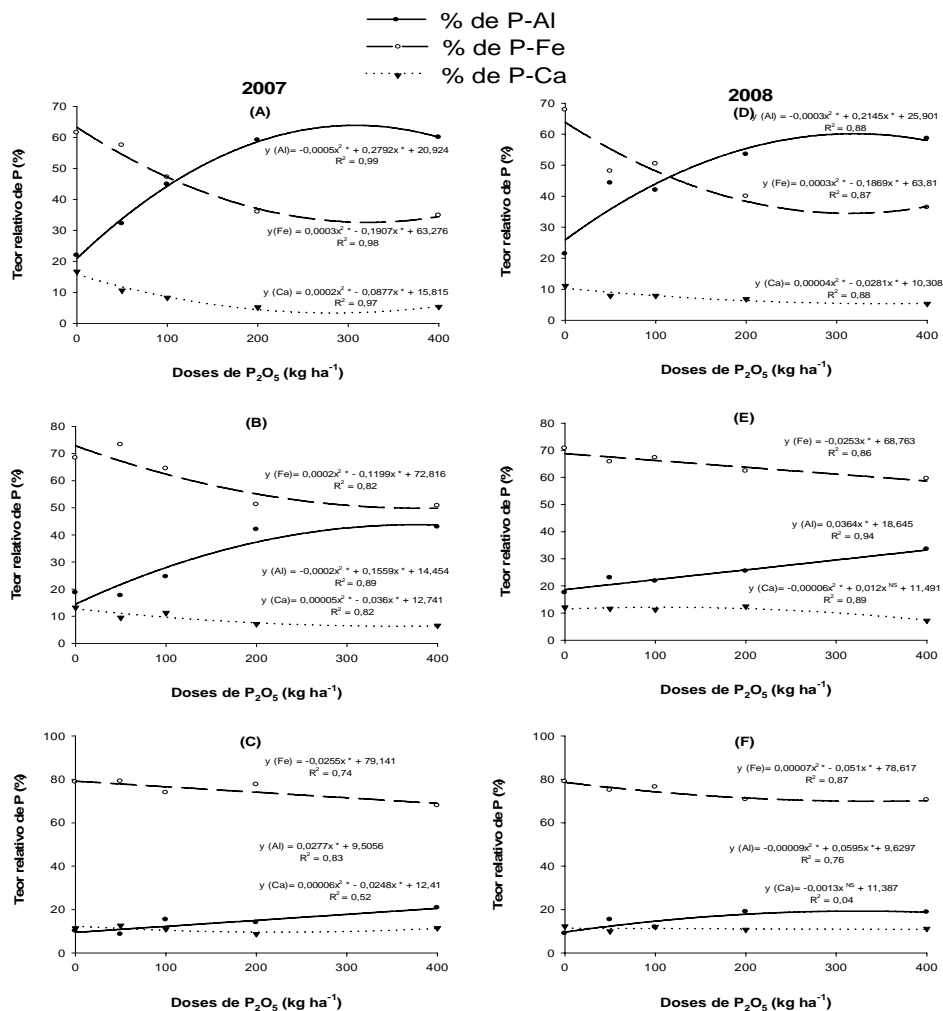
Analisando-se os resultados obtidos pelo fracionamento do P inorgânico, em que não ocorreu a adição de P no solo (dose  $0 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $P_2O_5$ ), observa-se que a maior parte do nutriente está complexada com Fe, prevalecendo a ordem  $P\text{-Fe} > P\text{-Al} > P\text{-Ca}$ , para todas as camadas avaliadas nos dois anos (Tabela 2 e Figura 5). Esses resultados corroboram com aqueles normalmente obtidos nos solos ácidos brasileiros (Silva, 2002; Motta et al., 2002; Raij, 2004), refletindo o estágio avançado de intemperismo em que estes solos se encontram (Machado et al., 1993).

**TABELA 2** Teores de P-Al, P-Fe e P-Ca determinados em amostras de um Latossolo Vermelho distrófico típico (LVd) de Planaltina, DF, submetido a doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> por vários anos, em dois anos de estudo, 2007 e 2008.

Doses de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg ha <sup>-1</sup> )	Ano 2007			Ano 2008			Depleção de P *		
	Profundidade (cm)			Profundidade (cm)			Profundidade (cm)		
	0 a 10	10 a 20	20 a 40	0 a 10	10 a 20	20 a 40	0 a 10	10 a 20	20 a 40
<b>P-Al (mg kg<sup>-1</sup>)</b>									
0	26,1	11,3	4,2	25,6	10,1	3,6	-0,5 (-2%) **	-1,2 (-10%)	-0,6 (-14%)
50	56,3	11,9	3,6	135,4	15,6	8,1	79,1 (140%)	3,7 (31%)	4,5 (126%)
100	146,5	19,5	9,2	109,4	15,5	5,4	-37,1 (-25%)	-4,0 (-21%)	-3,8 (-41%)
200	347,5	85,6	8,2	272,3	21,0	11,4	-75,2 (-22%)	-64,6 (-76%)	3,2 (38%)
400	421,3	91,4	19,1	355,6	52,5	13,0	-65,7 (-16%)	-38,9 (-43%)	-6,1 (-32%)
<b>P-Fe (mg kg<sup>-1</sup>)</b>									
0	73,3	41,4	32,5	81,8	41,0	31,5	8,5 (12%)	-0,3 (-1%)	-1,0 (-3%)
50	98,2	49,2	32,1	146,2	44,8	39,7	48,0 (49%)	-4,4 (-9%)	7,7 (24%)
100	153,4	50,5	44,0	131,3	48,0	35,0	-22,0 (-14%)	-2,6 (-5%)	-9,0 (-20%)
200	211,0	102,1	49,3	203,5	51,6	42,2	-7,5 (-4%)	-50,5 (-49%)	-7,1 (-14%)
400	240,7	108,5	62,4	220,6	93,1	48,3	-20,1 (-8%)	-15,4 (-14%)	-14,1 (-23)
<b>P-Ca (mg kg<sup>-1</sup>)</b>									
0	19,9	8,0	4,7	13,4	7,0	4,9	-6,6 (-33%)	-1,0 (-12%)	0,1 (3%)
50	18,0	6,4	5,2	23,8	7,9	5,3	5,8 (32%)	1,5 (24%)	0,1 (2%)
100	26,9	8,8	6,8	20,0	8,1	5,5	-6,4 (-24%)	-0,8 (-9%)	-1,2 (-18%)
200	30,6	14,2	5,3	34,8	10,3	6,3	4,2 (14%)	-3,8 (-27%)	1,1 (20%)
400	36,9	14,0	10,6	32,2	11,7	7,6	-4,7 (-13%)	-2,6 (-19%)	-3,0 (-28%)

\* Os valores dessas colunas foram obtidos pela diferença entre os teores do ano 2008 e 2007.

\*\* % da diferença do ano de 2008 em relação ao ano de 2007.



**FIGURA 5** Teores de P ligado a Ca, Fe e Al relativos ao P inorgânico total do solo –  $\Sigma$  (P-Ca + P-Fe + P-Al), em diferentes profundidades, num LVD de Planaltina, DF, em função da aplicação de doses anuais de  $P_2O_5$ , em amostras coletadas em dois anos (A, B e C = camadas 0 a 10, 10 a 20 e 20 a 40cm, respectivamente, no ano 2007; D, E e F = camadas 0 a 10, 10 a 20 e 20 a 40cm, respectivamente, no ano 2008).  
 \* Significativo, pelo teste de t, a 5%.

À medida que aumentaram-se as doses de P no solo, nota-se que todas as frações inorgânicas do nutriente tenderam a aumentar, de modo mais expressivo o P-Al, seguido do P-Fe e, posteriormente, o P-Ca (Tabela 2). Esse comportamento foi observado com maior destaque nas camadas 0 a 10 e 10 a 20cm, uma vez que a adubação fosfatada na cultura do cafeeiro ocorre em superfície, sem haver incorporação e este nutriente tem baixa mobilidade no solo (Novais & Smith, 1999).

Observou-se, com relação aos valores relativos de P no solo, na camada de 0 a 10cm, nos dois anos avaliados, que a proporção de P-Fe foi maior que a de P-Al até a dose de 111,2 e 113,8 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, respectivamente nos anos 2007 e 2008, quando elas se igualaram próximo a 46% de contribuição com o P inorgânico total (Figura 5A e 5D). A partir daí, os compostos de Al controlam a disponibilidade de P, uma vez que os teores relativos de P-Al aumentam em detrimento daqueles de P-Fe. Nas camadas de 10 a 20cm (Figura 5B e 5E) e de 20 a 40cm (Figura 5D e 5F), observa-se que houve uma diminuição da proporção de P-Fe, como também um aumento da proporção de P-Al, mostrando que existe um efeito da aplicação dessas doses de P em determinada profundidade. Entretanto, ocorre um comportamento diferente da camada de 0 a 10cm, não havendo um ponto de equilíbrio entre o P-Fe e o P-Al no intervalo de doses estudado. Estes resultados são coincidentes com os de Bahia Filho et al. (1982), que também observaram maiores incrementos relativos para P-Al quando aplicaram superfosfato triplo no solo, apesar de P-Fe ser a fração predominante. Analisando-se as inclinações das equações de regressão obtidas naquele trabalho também se observa uma semelhança

na tendência de um ponto de equilíbrio entre o P-Al e o P-Fe, se as doses de  $P_2O_5$  aplicadas fossem extrapoladas.

As elevadas taxas de conversão do fósforo adicionado em P-Al e P-Fe evidenciam a relevância dos óxidos de Fe e Al, no que tange à adsorção de fósforo em solos ácidos (Barbosa Filho et al., 1987). Normalmente, em solos intemperizados, as formas de P-Fe aumentam com o tempo de contato entre o fosfato e o solo (Novelino, 1999). Entretanto, quando o P adicionado ao solo reage com estes metais, primeiramente há um estágio amorfo de complexação, a partir do qual ocorre a cristalização dos compostos. Em meio ácido, o P-Al cristaliza-se numa velocidade inferior à do P-Fe e, sendo assim, permanece disponível para as plantas por maior tempo (Juo & Ellis, 1968). Isso explica, em parte, os maiores teores de P-Al no presente trabalho. Neste contexto, ainda é necessário considerar que o solo vem recebendo adubações fosfatadas anuais por seis anos consecutivos e, portanto, apesar das extrações de P pelo cafeeiro ao longo dos seus ciclos de cultivo, existe uma disponibilidade de P no solo muito mais expressiva que aquela encontrada em outros estudos.

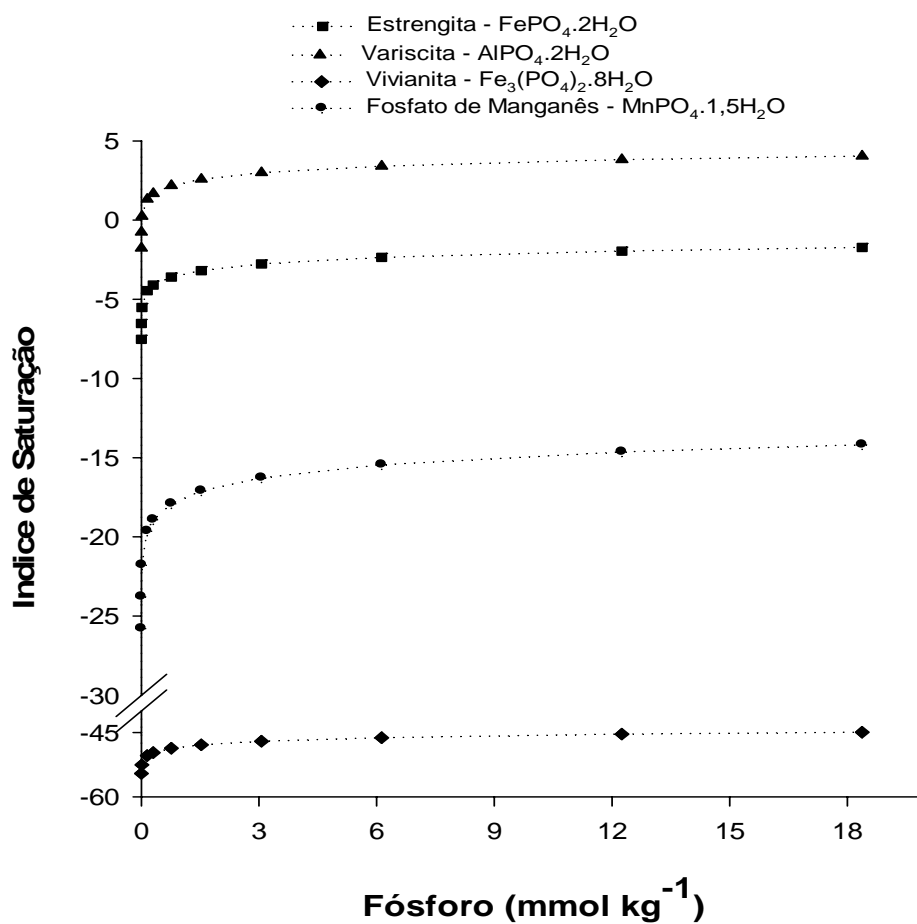
A maior disponibilidade de P-Al para as plantas de café pode ser confirmada ao observar a depleção de P de um ano para o outro em função do ciclo de produção da cultura (Tabela 2). Nota-se que, apesar do incremento de P no sistema solo-planta em função das doses de  $P_2O_5$  aplicadas, o compartimento P-Al foi, em geral, o que apresentou os maiores déficits de P em todas as camadas avaliadas, em função da produtividade do cafeeiro, quando se observam os dois anos de estudo. Também houve depleção dos teores de P-Fe em uma magnitude

intermediária e de P-Ca em uma magnitude menos expressiva em relação às demais.

Ao considerar um equilíbrio químico entre o P, como ortofosfato, e os metais Fe e Al disponíveis no solo, possivelmente estão sendo formadas a variscita ( $\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) e a strengita ( $\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) (Lindsay, 1979). Sabe-se que, em solos ácidos, estas espécies minerais apresentam alta estabilidade química (Lindsay et al., 1989; Iuliano et al., 2007 e 2008) e, portanto, baixa solubilidade.

Utilizando-se o software USGS FREEQC, foi proposto um equilíbrio químico termodinâmico entre algumas espécies minerais de fósforo que poderiam ser formadas pela adição do nutriente no solo, nas seguintes condições: caulinita, gibbsita e  $\text{Al}(\text{OH})_3$  (amorfo) controlando a disponibilidade de  $\text{Al}^{3+}$ ; goethita, hematita e  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  (amorfo) controlando a disponibilidade de  $\text{Fe}^{3+}$ ; manganita controlando a disponibilidade de  $\text{Mn}^{3+}$ ; faixa de pH entre 4,6 e 5,5;  $100 \text{ mg dm}^{-3}$  de  $\text{CO}_2$  da respiração do solo e 15% de gás  $\text{O}_2$ . Ressalta-se que estas condições são semelhantes àquelas de campo e que o superfosfato triplo foi considerado como fonte de P. Por meio desta simulação de equilíbrio químico termodinâmico pode-se observar claramente que a variscita é o mineral que preferencialmente está sendo formado, uma vez que o índice de saturação para a sua formação foi excedido (Figura 6). Isso é pertinente para explicar os maiores valores do compartimento P-Al em detrimento do P-Fe (Tabela 2 e Figura 5). Nesta ocasião, não foi alcançado o índice de saturação para que a strengita pudesse ser formada e, dessa maneira, demonstra-se o porquê da menor obtenção de P-Fe em relação ao P-Al. Pode-se também inferir que o P-Fe determinado pelo

fracionamento (Chang & Jackson, 1957) não é proveniente da estrengita, mas sim de outras formas de P-Fe no solo. Em condições de laboratório, foi observado que a formação da estrengita é favorecida em uma solução com alta concentração de P e baixo pH, situação tal que podem ser formadas ambas as espécies minerais, estrengita e variscita (Iuliano et al., 2008).



**FIGURA 6** Equilíbrio termodinâmico simulado entre as possíveis espécies minerais formadas no solo, em função da aplicação de fósforo como superfosfato triplo.

A maior quantidade de P-Al, provavelmente, também está relacionada aos altos teores de Al trocável e aos baixos valores de pH do solo (vide Tabela 2, capítulo II). Por meio da correção adequada do solo, para valores de pH em água entre 6 e 6,5, certamente ocorrerá maior solubilização das frações de P-Al e P-Fe e, portanto, um bom aproveitamento da adubação fosfatada pois nessa faixa de pH ocorre maior solubilidade dos compostos fosfatados ligados a Ca, Fe e Al (Lindsay et al., 1989; Malavolta, 2006; Novais et al., 2007). Por outro lado, deve-se atentar para que não ocorra uma calagem excessiva do solo, pois assim poderão ser formados compostos fosfatados minerais de menor solubilidade ligados ao Ca, como, por exemplo, fosfatos tricálcicos –  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  e hidroxiapatitas –  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$  (Lindsay, 1979).

Apesar da fonte de fósforo utilizada no ensaio ser um fosfato de cálcio (Superfosfato Triplo –  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)\cdot\text{H}_2\text{O}$ ), os valores relativos e absolutos de P-Ca apresentam-se bem menos expressivos em relação aos demais compartimentos de P inorgânico (Tabela 2 e Figura 5). Tal fato pode ser explicado em virtude dos baixos valores de pH do solo e, concomitantemente, dos baixos teores de cálcio trocável (vide Tabela 2, capítulo II), uma vez que aumentos nos teores de P-Ca normalmente são obtidos em função da calagem do solo (Barbosa filho et al., 1987). À medida que os solos vão se tornando mais intemperizados, pela remoção de bases e sílica, as formas mais solúveis de P-Ca são convertidas para P-Al e P-Fe (Hsu, 1989).

Em um estudo com cinco solos da Carolina do Norte, sendo quatro de textura média a arenosa e um caulínico e argiloso, Novais & Kamprath (1978) mostraram que o P-Al foi a forma que mais contribuiu



com o fornecimento do nutriente para a planta, na maioria dos solos, exceto naquele mais argiloso em que o P-Fe foi maior que o P-Al. Noutra situação, após 23 anos de cultivo com fertilizações anuais em um Andossolo, observou-se que o P-Al também foi a forma que mais contribuiu para a absorção de P pelas plantas, seguido do P-Fe (Takahashi & Anwar, 2006).

Ao associar os valores relativos dos compartimentos de P e os teores de P disponível determinados pelos extratores de rotina, observa-se correlação positiva entre os teores de P-Mehlich-1 e P-resina com os valores de P-Al e correlação negativa com os demais valores de P-Fe e P-Ca (Tabela 3). Isso reforça as evidências de que o P-Al é a forma de P no solo que está preferencialmente disponibilizando o nutriente para as plantas de café neste sistema com grandes incrementos anuais de P. Entretanto, quando se consideram diferentes tipos de solo, qualquer uma das formas de P pode ser importante fonte de P para as plantas (Novais & Smith, 1999).

Observou-se também alta correlação entre os teores de P obtidos com os extratores Mehlich-1 e resina de troca iônica (Tabela 3). Resultados semelhantes também foram encontrados por Novelino (1999). Por outro lado, estes resultados não são coincidentes com aqueles normalmente encontrados na literatura (Holanda et al., 1995; Raij, 1998; Silva & Raij, 1999).

Apesar de o extrator Mehlich-1 ser sensível a solos com alto fator capacidade de fósforo (Novais & Smith, 1999), a quantidade de P-Ca é baixa em todas as três camadas em relação a P-Fe e P-Al e, nestas condições, sob adubação fosfatada com fontes solúveis, ambos os

extratores estão sendo semelhantes em estimar o P disponível para as plantas.

**TABELA 3** Coeficientes de correlação linear simples entre os extratores Mehlich-1 e resina de troca iônica e as formas relativas de P-Al, P-Fe e P-Ca, em dois anos de estudo, 2007 e 2008, onde se utilizaram doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> por vários anos, em um LVd de Planaltina, DF.

Correlações	P-Mehlich-1	P-resina	% P-Al	% P-Fe	% P-Ca
<b>Camada 0 a 10cm</b>					
P-Mehlich-1	-	0,994*	0,784*	-0,792*	-0,649*
P-resina	0,994*	-	0,776*	-0,782*	-0,649*
<b>Camada 10 a 20cm</b>					
P-Mehlich-1	-	0,981*	0,912*	-0,843*	-0,805*
P-resina	0,981*	-	0,897*	-0,841*	-0,759*
<b>Camada 20 a 40cm</b>					
P-Mehlich-1	-	0,876*	0,849*	-0,852*	-0,107 <sup>NS</sup>
P-resina	0,876*	-	0,788*	-0,837*	0,033 <sup>NS</sup>
<b>Camada 0 a 40cm</b>					
P-Mehlich-1	-	0,993*	0,774*	-0,760*	-0,622*
P-resina	0,993*	-	0,792*	-0,776*	-0,642*

\* Teste de t (p<0,001).

### 5.3 Experimento II

Apesar de não poderem ser comparados estatisticamente, os teores de P obtidos pelos extratores de rotina, Mehlich-1 e resina de troca iônica foram maiores em todas as camadas estudadas, nos dois anos avaliados, para a área em que foram aplicados 300 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (Tabela 4). Embora os teores de P no solo já estivessem altos em 2007 (CFSEMG, 1999) nesta área, as plantas, provavelmente, produziram mais que a área

**TABELA 4** Teores relativos de fósforo inorgânico no solo, ligado a Ca, Fe e Al, em três profundidades em um PVd de Cabo Verde, MG, em função da aplicação de doses de fósforo, em dois anos de estudo, 2007 e 2008.

Áreas	Ano de 2007			Ano de 2008		
	Profundidades (cm)			Profundidades (cm)		
	0 a 10	10 a 20	20 a 40	0 a 10	10 a 20	20 a 40
	<b>P-Mehlich-1* (mg dm<sup>-3</sup>)</b>			<b>P-Mehlich-1 (mg dm<sup>-3</sup>)</b>		
Área adjacente	0,9	0,5	0,4			
Adubação Convencional	5,5A	1,1B	1,5B	4,5A	3,3A	1,4A
300 kg ha <sup>-1</sup> P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	33,2A	5,5B	3,5B	72,1A	8,3B	9,1B
	<b>P-resina* (mg dm<sup>-3</sup>)</b>			<b>P-resina (mg dm<sup>-3</sup>)</b>		
Área adjacente	3,7	3,0	2,7			
Adubação Convencional	7,5A	2,3B	3,5B	5,1A	0,4A	2,3A
300 kg ha <sup>-1</sup> P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	41,2A	15,6B	4,0C	75,8A	12,0B	14,9B
	<b>% P-Al</b>			<b>% P-Al</b>		
Área adjacente	28,6	29,8	32,1			
Adubação Convencional	25,6bB	28,0bB	33,5aA	24,2bB	26,7bB	30,5bA
300 kg ha <sup>-1</sup> P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	37,4aB	43,5aA	34,9aB	39,7aA	34,2aB	37,7aA
	<b>%P-Fe</b>			<b>%P-Fe</b>		
Área adjacente	57,2	58,7	56,0			
Adubação Convencional	55,1aB	58,7aA	53,6aB	56,2aB	60,7aA	55,7aB
300 kg ha <sup>-1</sup> P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	42,5bB	44,5bB	51,1bA	37,9bC	51,8bA	46,3bB
	<b>%P-Ca</b>			<b>%P-Ca</b>		
Área adjacente	14,2	11,5	11,9			
Adubação Convencional	19,4aA	13,4aB	12,9aB	19,6aA	12,7aB	13,8aB
300 kg ha <sup>-1</sup> P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	20,1aA	12,0aB	14,1aB	22,4aA	14,0aB	16,0aB

Médias seguidas por letras iguais, minúsculas nas colunas e maiúsculas nas linhas, não diferem entre si, a 5%, pelo teste de Scott-Knott. \*Os dados referentes aos extratores de rotina não podem ser comparados entre as áreas, pois não atendem aos critérios estatísticos do teste de F máximo para análise conjunta dados.

sob adubação convencional, devido à aplicação dos fertilizantes fosfatados. Observou-se, ainda, que, mesmo após a colheita, os teores de P disponível por Mehlich-1 e resina de troca iônica tiveram um incremento expressivo, na camada de 0 a 10cm, de 2007 para o ano de

2008, mostrando também que o cafeeiro não consegue aproveitar toda a quantidade de P aplicada ao solo, mesmo sob maiores produções.

É interessante ressaltar que, apesar de os teores de P disponível pelos extratores de rotina tenderem a aumentar de um ano para o outro, na área em que foram aplicados 300 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, os valores de pH do solo encontravam-se abaixo da faixa de maior solubilidade dos compostos fosfatados (vide Tabela 3, capítulo II) (Lindsay et al., 1989; Malavolta, 2006).

Com relação aos resultados obtidos pelo fracionamento do P inorgânico (Chang & Jackson, 1957), houve interação significativa das áreas avaliadas com as frações relativas de P em todas as camadas apenas para P-Al e P-Fe (Tabela 4).

O solo, em sua condição natural apresentou alta quantidade relativa de P-Fe, média de 57%, seguido de P-Al, média de 31,2% e, por último, P-Ca, com média de 12,5%, nas três profundidades estudadas. Esses resultados corroboram os de pesquisa em solos brasileiros, os quais mostram P-Fe>P-Al>P-Ca (Raij, 2004).

A área de adubação convencional mostrou grande semelhança com a área nativa adjacente, apresentando uma mesma ordem de proporção de P ligado aos três elementos para todas as camadas avaliadas. Cabe destacar que o compartimento do P-Ca da camada de 0 a 10cm é o que sofre maior alteração nesta área em relação à área nativa, uma vez que são feitas calagens ocasionais e, ainda, devido à ciclagem de nutrientes das camadas mais profundas realizada pelo cafeeiro. As proporções de P da área sob adubação convencional praticamente não se alteraram de um ano para o outro, obviamente devido a não adição de fertilizante fosfatado

nesse período e à menor produtividade em relação à área que recebeu 300 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Entretanto, os teores absolutos de todas as frações diminuíram de 2007 para o ano de 2008 (Tabela 5), indicando que qualquer uma das frações de P pode fornecer o nutriente às plantas (Novais & Smith, 1999), com destaque, nesta área, para as frações P-Fe e P-Al.

A área que recebeu adubação de 300 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> apresentou P-Fe>P-Al>P-Ca, em todas as camadas avaliadas no ano de 2007. Entretanto, na camada de 0 a 10cm, onde ocorre a adição de fertilizantes, observa-se que os valores de P-Al são muito próximos daqueles de P-Fe, tendência que também ocorre na camada de 10 a 20cm desta área. Para o ano de 2008, a camada de 0 a 10cm comportou-se diferente das demais e apresentou P-Al>P-Fe, ainda que em proporções bem próximas. Isso evidencia que, apesar de os teores absolutos de P-Fe e P-Al aumentarem quando ocorre adição de P no solo (Tabela 5), os teores de P-Al aumentam com maior intensidade que aqueles de P-Fe. Esses resultados corroboram com aqueles obtidos em um Latossolo Vermelho Escuro por Bahia Filho et al. (1982). Analisando ainda os valores relativos de P em 2008, observa-se maior participação de P-Al em relação ao P-Fe, mesmo que estejam em magnitudes próximas (Tabela 4).

Observa-se que, na camada de 10-20cm, o P-Al relativo diminuiu de maneira expressiva em relação ao ano anterior (Tabela 5). Isso, provavelmente, ocorreu devido à maior produtividade dessa área e, portanto, maior demanda de P pela planta, fornecido por meio do P-Al.

**TABELA 5** Teores de P-Al, P-Fe e P-Ca determinados em amostras de um Argissolo Vermelho distrófico típico (Pvd) de Cabo Verde, MG, em áreas de adubação convencional, adubação com 300 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e área adjacente, 2007 e 2008.

Áreas	Profundidades (cm)	2007			2008			Depleção*		
		P-Al	P-Fe	P-Ca	P-Al	P-Fe	P-Ca	P-Al	P-Fe	P-Ca
<b>mg kg<sup>-1</sup></b>										
Adubação convencional	0 a 10	24,5	52,8	18,6	21,2	49,4	17,6	-3,3 (-14%)**	-3,4 (-7%)	-1,0 (-5%)
Adubação convencional	10 a 20	13,9	29,2	6,7	15,5	35,4	7,4	1,6 (12%)	6,2 (21%)	0,7 (10%)
Adubação convencional	20 a 40	13,4	21,6	5,2	13,2	24,0	6,0	-0,2 (-2%)	2,4 (11%)	0,8 (14%)
300 kg ha <sup>-1</sup> P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0 a 10	55,3	62,1	29,5	86,0	81,9	48,6	30,7 (56%)	19,9 (32%)	19,1 (65%)
300 kg ha <sup>-1</sup> P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	10 a 20	32,1	32,6	8,8	23,2	35,1	9,4	-8,9 (-28%)	2,5 (8%)	0,6 (7%)
300 kg ha <sup>-1</sup> P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	20 a 40	15,9	23,3	6,4	28,1	34,6	12,1	12,2 (77%)	11,3 (48%)	5,7 (89%)
Área adjacente	0 a 10	14,3	28,6	7,1						
Área adjacente	10 a 20	10,9	21,5	4,2						
Área adjacente	20 a 40	10,2	17,8	3,8						

\* Os valores dessas colunas foram obtidos pela diferença dos teores de 2008 e 2007.

\*\* Valores entre parênteses representam a porcentagem (%) da diferença do ano de 2008 em relação ao ano de 2007.

Para o P-Ca, nota-se ligeiro aumento em seus valores relativos na área que recebeu adubação de 300 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> de um ano para o outro (Tabela 4), provavelmente devido à calagem realizada na área neste período. Os valores absolutos de P-Ca para esta mesma área também aumentaram de 2007 para 2008 (Tabela 5), reforçando essa observação. Para a área convencional, não há mudanças expressivas nos teores relativos de P dessa fração. Portanto, apesar da adição de doses elevadas de fertilizante fosfatado originalmente ligado ao cálcio, o P-Ca não foi a fração dominante de P no solo e, certamente, não contribui de maneira efetiva para o suprimento de fósforo no solo ao longo dos cultivos.

É interessante comentar, ainda, que, à medida que se aumenta a quantidade de P aplicada ao solo, maior é a importância do compartimento inorgânico em relação ao orgânico (Rheinheimer et al., 2000; Conte et al., 2003; Santos, 2008). Neste contexto, ressalta-se que parte daquelas formas de fósforo biodisponíveis que se acumularam no solo em função da aplicação de doses anuais de P encontra-se na forma inorgânica (Capítulo II). Sendo assim, neste trabalho, as formas biodisponíveis de P no solo são, em sua maioria, compostas pelas frações P-Al e P-Fe e, em menor intensidade, P-Ca. Isso, certamente, demonstra a influência da mineralogia sobre o comportamento do fósforo no solo, uma vez que foram aplicadas grandes quantidades de P originalmente ligado a Ca e, devido às altas quantidades de Fe e Al disponíveis por meio dos argilominerais (Tabela 1), houve uma conversão desse P-Ca em P-Fe e, principalmente, P-Al. Portanto, ao aplicar doses anuais de P no solo, o nutriente, preferencialmente, acumula-se no compartimento biodisponível

(Capítulo II), predominando as formas inorgânicas P-Al e, em menor magnitude, P-Fe.

## 6 CONCLUSÃO

O P aplicado ao solo encontra-se principalmente ligado ao Al e esta é a forma de fósforo no solo que está predominantemente fornecendo o nutriente ao cafeeiro.

As frações de P neste trabalho apresentaram a seguinte magnitude: P-Al>P-Fe>P-Ca.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTUNES, F. Z. Caracterização climática do Estado de Minas Gerais. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.12, n.138, p.9-13, jun. 1986.

BAHIA FILHO, A.F.C.; VASCONCELLOS, C.A.; SANTOS, H.L.; MENDES, J.F.; PITTA, G.V.E.; OLIVEIRA, A.C. 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, n. 2, p. 99-104, 1982.

BARBOSA FILHO, M. P.; KINJO, T.; MURAOKA, T. Relações entre fósforo “extraível”, frações inorgânicas de fósforo e crescimento do arroz em função de fontes de fósforo, calagem e tempo de incubação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 11, n.2, p. 147-155, maio/ago. 1987.



BATAGLIA, O.C. Resposta à adubação fosfatada na cultura do café. In: YAMADA, T; ABDALLA, S.R.S. (Ed.). **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: Potafos/Anda, 2004. p. 307-328.

COMISSÃO DE FERTILIDADE DE SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, MG, 1999. p. 289-302.

CHANG, S.C.; JACKSON, M.L. Fractionation of soil phosphorus. **Soil Science**, Baltimore, v.84, n. 1, p. 133-144, Aug. 1957.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Histórico de produção de café**. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conabweb/index.php?PAG=132>>. Acesso em: 29 jan. 2009

CONTE, E.; ANGHINONI, I; RHEINHEIMER, D.S. Frações de fósforo acumuladas em latossolo argiloso pela aplicação de fosfato no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.27, n. 5, p. 893-900, set./out. 2003.

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

EBERHARDT, D.N.; VENDRAME, P.R.S.; BECQUER, T.; GUIMARÃES, M.F. Influência da granulometria e da mineralogia sobre a retenção do fósforo em Latossolos sob pastagens no cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.32, n.3, p. 1009-1016, maio/jun. 2008.

FERREIRA, D.F. Análises estatísticas por meio do SISVAR para Windows versão 4.0. In: REUNIÃO ANUAL DA REGIÃO BRASILEIRA DA SOCIEDADE INTERNACIONAL DE BIOMETRIA, 45., 2000, São Carlos. **Programas e Resumos...**São Carlos: UFSCar, 2000. p. 235.

FERNÁNDEZ R., I.E.; NOVAIS, R.F.; NUNES, F.N.; KER, J.C.  
Reversibilidade de fósforo não-lábil em solos submetidos à redução microbiana e química. II – Extrações sucessivas do fósforo pela resina de troca aniônica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.32, n. 6, p. 2319-2330, nov./dez. 2008.

GALLO, P.B.; RAIJ, B.van; QUAGGIO, J.A.; PEREIRA, L.C.E.  
Resposta de cafezais adensados à adubação NPK. **Bragantia**, Campinas, v.58, n.2, p.341-351, 1999.

GUERRA, A.F.; ROCHA, O.C.; RODRIGUES, G.C.; SANZONOWICZ, C.  
Manejo da irrigação do cafeeiro, com estresse hídrico controlado, para uniformização de florada. In.: ZAMBOLIM, L. (Ed.). **Boas práticas agrícolas na produção de café**. Viçosa, MG: UFV, 2006.

GUERRA, A.F.; ROCHA, O.C.; RODRIGUES, G.C.; SANZONOWICZ, C.; RIBEIRO FILHO, G.C.; TOLEDO, P.M.R.; RIBEIRO, L.F.  
Sistema de produção de café irrigado: um novo enfoque. **ITEM**, Brasília, n.73, p. 52-61, 2007.

GUIMARÃES, P.T.G. **Respostas do cafeeiro (*Coffea arabica* L. cv. Catuaí) à adubação mineral e orgânica em solos de baixa fertilidade do Sul de Minas Gerais**. 1986. 140p. (Tese de Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.

HOLANDA, J.S.; BRASIL, E.C.; SALVIANO, A.A.C.; CARVALHO, M.C.S.; RODRIGUES, M.R.L.; MALAVOLTA, E.  
Eficiência de extratores de fósforo para um solo adubado com fosfatos e cultivado com arroz. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.52, n.3, p.561-568, set./dez. 1995.

HSU, P.H. Aluminum oxides and oxyhydroxids. In: DIXON, J.B.; WEED, S.B. (Ed.). **Minerals in soil environments**. 2.ed. Madison: SSSA, 1989. P. 1701-1706. (SSSA Book Series, 1).

IULIANO, M.; CIAVATTA, L.; TOMMASO, G. On the Solubility Constant of Strengite. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 71, n. 4, p. 1137-1140, July/Aug. 2007.

IULIANO, M.; CIAVATTA, L.; TOMMASO, G. The solubility constant of variscite. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 72, n. 2, p. 343-346, Mar./Apr. 2008.

JUO, A.S.R.; ELLIS, B.G. Particle size distribution of aluminum, iron and calcium phosphates in soil profiles. **Soil Science**, Baltimore, v.106,n.5, p.374-380, 1968.

KÄMPF, N.; CURI, N. Óxidos de ferro: indicadores de ambientes pedogênicos. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: SBCS, 2000. v.1., p.107-138.

LINDSAY, W.L. **Chemical equilibria in soils**. New York: Wiley-Interscience, 1979. 449 p.

LINDSAY, W.L.; VLEK, P.L.G.; CHIEN, S.H. Phosphate Minerals. In: DIXON, J.B.; WEED, S.B. (Ed.). **Minerals in soil environments**. 2.ed. Madison: SSSA, 1989. p. 1089-1131. (SSSA,Book Series, 1).

MACHADO, M.I.C.S.; BRAUNER, J.L.; VIANNA, A.C.T. Formas de fósforo na camada arável de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.17, n.3, p.331-336, set./dez. 1993.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006. 631 p.

MALAVOLTA, E. Nutrição, adubação e calagem para o cafeeiro. In: RENA, A.B.; MALAVOLTA, E.; ROCHA, M.; YAMADA, T. (Ed.). **Cultura do cafeeiro**: fatores que afetam a produtividade. Piracicaba: Potafos, 1986. p. 136-274.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. New York: Academic, 1995. 887p.

MEHRA, O.P.; JACKSON, M.L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. **Clays and Clay Minerals**, Clarkson, v.7, n.2, p.317-327, 1960.

MOTTA, P.E.F.; CURI, N.; SIQUEIRA, J.O.; RAIJ, B. van; FURTINI NETO, A.E.; LIMA, J.M. Adsorção e formas de fósforo em latossolos: influência da mineralogia e histórico de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 26, n. 2, p. 349-359, abr./jun. 2002.

MURPHY, J.; RILEY, J.P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Analítica Chimica Acta**, Amsterdam, v.27, n.1, p.31-36, 1962.

NOVAIS, R.F.; KAMPRATH, E.J. Phosphorus supplying capacities of previously heavily fertilized soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 42, p. 931-935, 1978.

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

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J.; NUNES, F.N. Fósforo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: SBCS, 2007. 471-550p.

NOVELINO, J.O. **Disponibilidade de fósforo e sua cinética, em solos sob cerrado fertilizados com fósforo, avaliada por diferentes métodos de extração**. 1999. 70p. (Tese de Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG

PREZOTTI, L.C.; ROCHA, A.C. Nutrição do cafeeiro arábica em função da densidade de plantas e da fertilização com NPK. **Bragantia**, Campinas, v.63, n.2, p.239-251, maio/ago. 2004.

RAIJ, B. van. Bioavailable testes: alternatives to standard soil extractions. **Communication in Soil Science and Plant Analyses**, New York, v. 29, n.11-14, p. 1553-1570, 1998.

RAIJ, B. van. Fósforo no solo e interação com outros elementos. In: YAMADA, T; ABDALLA, S.R.S. (Ed.) **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: Potafos/ Anda, 2004. p. 107-116.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2.ed. Campinas: Instituto Agrônômico, 1997. 285p. (Boletim Técnico, 100).

RAIJ, B.van.; QUAGGIO, J.A.; CANTARELLA, H. **Análise química do solo para fins de fertilidade**. Campinas: Fundação Cargil, 1987. 107p.

RESENDE, M.; BAHIA FILHO, A.F.C.; BRAGA, J.M. Mineralogia da argila de Latossolos estimada por alocação a partir do teor total de óxidos do ataque sulfúrico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.11, n.1, p. 17-23, jan./abr. 1987.

RESENDE, M.; CURI, N.; SANTANA, D.P. **Pedologia e fertilidade do solo: interações e aplicações**. Brasília: Ministério da Educação/Lavras: ESAL/Piracicaba: Potafos, 1988. 81p.

RHEINHEIMER, D.S.; ANGHINONI, I.; KAMINSKI, J. Depleção do fósforo inorgânico de diferentes frações provocada pela extração sucessiva com resina em diferentes solos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.24, n. 2, p. 345-354, abr./jun. 2000.

SANTOS, J.Z.L. **Adubação fosfatada, frações de fósforo e resposta do feijoeiro, em latossolos de cerrado, com diferentes textura, mineralogia e histórico de uso**. 2008. 87p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas)-Universidade Federal de Lavras, Lavras.

SILVA, M.A. **Fracionamento de fósforo em Latossolos com diferentes usos, fósforo adicional, micorriza e cultivo com soja e braquiária em casa de vegetação**. 2002. 56p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.

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

SYERS, J.K.; BROWMAN, M.G.; SAMILLE, G.W.; COREY, R.B. Phosphate sorption by soils evaluated by the Langmuir adsorption equation. **Soil Science Society America Proceeding**, Madison, v.37, n.3, p.358-363, May/June 1973.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3.ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719p

TAKAHASHI, S.; ANWAR, M.R. Wheat yield, phosphorus uptake and soil phosphorus fraction after 23 years of annual fertilizer application to an Andosol. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 101, n.2, p.160-171, Mar. 2007.

TORRENT, J.; SCHWERTMANN, U.; FETCHER, H.; ALFEREZ, F. Quantitative relationships between soil color and hematite content. **Soil Science**, Baltimore, v.136, n.6, p.354-358, 1983.

VETTORI, L. **Métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura, 1969. (Boletim Técnico, 7).