

**DINÂMICA DE FÓSFORO EM SOLOS SOB
INFLUÊNCIA DA CALAGEM E ADUBAÇÃO
ORGÂNICA, CULTIVADOS COM FEIJOEIRO**

RENATO FERREIRA DE SOUZA

2005

59366

050639

RENATO FERREIRA DE SOUZA

**DINÂMICA DE FÓSFORO EM SOLOS SOB INFLUÊNCIA DA
CALAGEM E ADUBAÇÃO ORGÂNICA, CULTIVADOS COM
FEIJOEIRO**

Tese apresentada à Universidade Federal de
Lavras, como parte das exigências do Programa
de Pós-Graduação em Agronomia, área de
concentração em Solos e Nutrição de Plantas,
para a obtenção do título de "Doutor".

Orientador
Prof. Dr. Valdemar Faquin

LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL
2005

BIblioteca Central
UFPA
N. CLAS. 605.003
506
REGISTRO 59366

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

Souza, Renato Ferreira de

Dinâmica de fósforo em solos sob influência da calagem e adubação orgânica, cultivados com feijoeiro / Renato Ferreira de Souza. -- Lavras : UFLA, 2005.

141 p. : il.

Orientador: Valdemar Faquin.

Tese (Doutorado) – UFLA.

Bibliografia.

1. Calagem. 2. Adubação orgânica. 3. Adsorção de fósforo. 4. Formas de fósforo. 5. Fracionamento de fósforo. 6. Nutrição fosfatada. 7. feijão I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD-635.652895

RENATO FERREIRA DE SOUZA

**DINÂMICA DE FÓSFORO EM SOLOS SOB INFLUÊNCIA DA
CALAGEM E ADUBAÇÃO ORGÂNICA, CULTIVADOS COM
FEIJOEIRO**

Tese apresentada à Universidade Federal de
Lavras, como parte das exigências do Programa
de Pós-Graduação em Agronomia, área de
concentração em Solos e Nutrição de Plantas,
para a obtenção do título de “Doutor”.

APROVADA em 03 de Fevereiro de 2005

Prof. Dr. Augusto Ramalho de Moraes

DEX/UFLA

Pesq. Dr. Francisco Dias Nogueira

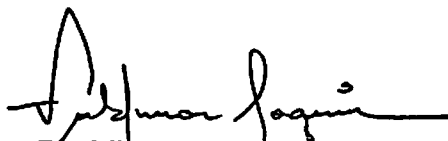
CTSM/EPAMIG

Prof. Dr. Nilton Curi

DCS/UFLA

Prof. Dr. Luiz Arnaldo Fernandes

NCA/UFMG



Prof. Dr. Valdemar Faquin

UFLA

(Orientador)

**LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL**

Agradeço a Deus,

Grandes foram as lutas, maiores as vitórias. Sempre estivestes conosco. Muitas vezes, pensamos que este momento nunca chegaria. Queríamos recuar ou parar; no entanto, Tu sempre estavas presente, fazendo da derrota uma vitória, da fraqueza uma força. Com Tua mão chegamos aqui. Não chegamos ao fim, mas ao início de uma nova caminhada...

À minha mãe, Giva, e a meus irmãos:

A vocês, que muitas vezes desistiram de seus momentos para que eu pudesse suportar a dor, que se dispuseram a me amparar em vários momentos difíceis, sempre me dando apoio e alívio, desdobrando-se para me dar conforto nos momentos de desesperança e ainda me desejam os mais variados sucessos, o meu sincero agradecimento. A vocês, que muito amo, ofereço minha história.

Ao meu pai, Francisco (in memoriam),

É chegado um grande momento de minha vida! Difícil acreditar que você partiu antes da chegada deste dia especial para mim. Mas a verdade é que isso aconteceu. E agora, no meio de tantos sorrisos, procuro o seu e só me vêm lembranças. Consigo imaginá-lo no meio de pessoas, felicitando-me com lágrimas nos olhos. Um imenso vazio toma conta de mim. Vazio que só é preenchido pela certeza de que, onde você estiver, sempre estará do meu lado, como sempre estive por todos esses anos, acompanhando-me, confortando-me e apoiando-me. Porque seu amor, mesmo com ausência física, é algo muito vivo e presente. E é esse amor também que me deu forças para concretizar este grande sonho. Hoje, a saudade é especialmente mais forte. Mas é uma saudade mesclada com a sua imagem, sorrindo para mim com muito orgulho, pois esta vitória também é sua.

AGRADECIMENTOS

Ao Departamento de Ciência do Solo, pela oportunidade de aprendizado e aperfeiçoamento, e ao CNPq, pela concessão da bolsa de estudo e suporte financeiro para a realização deste curso.

Aos professores,

“A um homem nada se pode ensinar. Tudo que se pode fazer é ajudá-lo a se encontrar. Poucas foram as oportunidades que tive para lhes agradecer por tão grandioso trabalho. Neste momento, quando celebro o final de uma caminhada, aproveito para prestar uma justa e sincera homenagem a vocês, que, pela amizade ou pelo simples convívio, apontaram-me o caminho”.

Aos amigos (as),

Àqueles (as) amigos (as) que, mesmo longe, acompanharam meus passos e que, quando foi preciso, estavam ao meu lado para caminharmos juntos; àqueles (as) que compartilharam comigo alegrias e tristezas, incentivando-me a prosseguir; aos amigos que aceitaram tantos “não” sem questionar, que estavam sempre disponíveis quando para eles o tempo era tão limitado. À minha grande companheira, Roseli, que muitas vezes deixei em segundo plano, agradeço pelo respeito, companheirismo, carinho, admiração e incentivo. A todos que, de uma forma ou de outra, contribuíram para esta conquista, o meu eterno agradecimento.

Aos funcionários do DCS,

“O que a gentileza livremente oferece, agradecimentos não podem pagar”. (John Mansfield)

A vocês que, pela dedicação ao trabalho, me ofereceram condições de percorrer esse caminho, meu sincero respeito e reconhecimento.

“Se eu pudesse deixar um presente para todos vocês, deixaria o acesso ao sentimento de amor. A consciência de aprender tudo que foi ensinado pelo tempo afora. Lembraria os erros que foram cometidos para que não mais se repetissem. A capacidade de escolher novos rumos. Deixaria para vocês, se pudesse, respeito àquilo que é indispensável: além do pão, o trabalho. Além do trabalho, a ação. E quando tudo mais faltasse, um segredo: o de buscar no interior de si mesmo a resposta para encontrar a saída”. (Mahatma Gandhi)

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	i
LISTA DE FIGURAS	vi
RESUMO GERAL	xi
GENERAL ABSTRACT	xiii
CAPÍTULO I	1
1 INTRODUÇÃO GERAL	3
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	5
2.1 Adsorção de fósforo no solo.....	5
2.2 Calagem e a adsorção de fósforo no solo	7
2.3 Matéria orgânica e a adsorção de fósforo no solo	8
2.4 Formas de fósforo no solo	12
2.5 Fracionamento das formas de fósforo	15
3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	18
CAPÍTULO II - ADSORÇÃO DE FÓSFORO EM SOLOS SOB INFLUÊNCIA DA CALAGEM E ADUBAÇÃO ORGÂNICA	27
RESUMO	29
ABSTRACT	31
1 INTRODUÇÃO	33
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	35
2.1 Caracterização e amostragem dos solos	35
2.2 Caracterização física, química e mineralógica dos solos	36
2.3 Delineamento experimental e tratamentos	38
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
3.1 Fósforo remanescente (P-rem)	42
3.2 Capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP)	47
3.3 Índice tampão de fósforo (ITP)	53
4 CONCLUSÕES.....	58
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

CAPÍTULO III - FORMAS DE FÓSFORO EM SOLOS SOB INFLUÊNCIA DA CALAGEM E ADUBAÇÃO ORGÂNICA.	65
RESUMO	67
ABSTRACT	69
1 INTRODUÇÃO	71
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	73
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	76
3.1 Fósforo extraível pelo extrator Mehlich-1	76
3.2 Formas de fósforo.....	81
4 CONCLUSÕES.....	95
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	96
CAPÍTULO IV - NUTRIÇÃO FOSFATADA E RENDIMENTO DO FEJJOEIRO SOB INFLUÊNCIA DA CALAGEM E ADUBAÇÃO ORGÂNICA.....	101
RESUMO	103
ABSTRACT	105
1 INTRODUÇÃO	107
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	109
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	111
3.1 Produção de matéria seca da parte aérea do feijoeiro no estágio de florescimento.....	111
3.2 Teores de fósforo na parte aérea do feijoeiro no estágio de florescimento	116
3.3 Produção de matéria seca da parte aérea do feijoeiro no estágio de maturação dos grãos	122
3.4 Produção de matéria seca de grãos.....	126
3.5 Acúmulo de fósforo na matéria seca da parte aérea total do feijoeiro.....	132
4 CONCLUSÕES.....	138
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	139

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO II

Pag.

- TABELA 1.** Principais atributos químicos, físicos e mineralógicos de amostras dos solos coletadas na camada de 0 a 20cm, antes da aplicação dos tratamentos..... 37
- TABELA 2.** Doses de calcário aplicadas às diferentes classes de solos..... 39
- TABELA 3.** Modelos ajustados para o P-rem (y) em função da aplicação de esterco bovino (MO) e calcário (CAL), para os solos RQo, LVAd-1, LVAd-2, LVd..... 45
- TABELA 4.** Estimativa dos parâmetros, significância e coeficientes de determinação (R^2) dos modelos ajustados apresentados na Tabela 3, e valores máximos para o P-rem e quantidades ótimas de esterco bovino (MO) e calcário (CAL), em cada solo..... 45
- TABELA 5** Modelos ajustados para a CMAP (y), em função da aplicação de esterco bovino (MO) e calcário (CAL), para os solos RQo, LVAd-1, LVAd-2 e LVd..... 50
- TABELA 6** Estimativa dos parâmetros, significância e coeficientes de determinação (R^2) dos modelos ajustados apresentados na Tabela 5, e valores mínimos para a CMAP e quantidades ótimas de esterco bovino (MO) e calcário (CAL), em cada solo..... 50
- TABELA 7** Modelos ajustados para o ITP (y), em função da aplicação de esterco bovino (MO) e calcário (CAL), para os solos RQo, LVAd-1, LVAd-2 e LVd..... 57
- TABELA 8** Estimativa dos parâmetros, significância e coeficientes de determinação (R^2) dos modelos ajustados apresentados na Tabela 7, e valores máximos para o ITP e quantidades ótimas de esterco bovino (MO) e calcário (CAL), em cada solo..... 57

CAPÍTULO III

Pag.

- TABELA 1.** Modelos ajustados para o P Mehlich-1 (y) em função da aplicação de esterco bovino (MO) e calcário (CAL), para os solos RQo, LVAd-1, LVAd-2, LVD..... 79
- TABELA 2.** Estimativa dos parâmetros, significância e coeficientes de determinação (R^2) dos modelos ajustados apresentados na Tabela 1, e valores máximos para o P Mehlich-1 e quantidades ótimas de esterco bovino (MO) e calcário (CAL), em cada solo. 79
- TABELA 3.** Equações de regressão ajustadas para as formas lábeis (P-resina+Pi-NaHCO₃ e Po- NaHCO₃); pouco lábeis (Pi e Po-NaOH 0,1+0,5 mol L⁻¹) e não lábeis de P (P-HCl+P-residual) (Y=mg dm⁻³) em função das doses de esterco bovino aplicadas (x=%) em cada nível de calcário (CAL) utilizado, no solo RQo. 84
- TABELA 4.** Equações de regressão ajustadas para as formas lábeis (P-resina+Pi-NaHCO₃ e Po- NaHCO₃); pouco lábeis (Pi e Po-NaOH 0,1+0,5 mol L⁻¹) e não lábeis de P (P-HCl+P-residual) (Y=mg dm⁻³) em função das doses de esterco bovino aplicadas (x=%) em cada nível de calcário (CAL) utilizado, no solo LVAd-1..... 86
- TABELA 5.** Equações de regressão ajustadas para as formas lábeis (P-resina+Pi-NaHCO₃ e Po- NaHCO₃); pouco lábeis (Pi e Po-NaOH 0,1+0,5 mol L⁻¹) e não lábeis de P (P-HCl+P-residual) (Y=mg dm⁻³) em função das doses de esterco bovino aplicadas (x=%) em cada nível de calcário (CAL) utilizado, no solo LVAd-2..... 89
- TABELA 6.** Equações de regressão ajustadas para as formas lábeis (P-resina+Pi-NaHCO₃ e Po- NaHCO₃); pouco lábeis (Pi e Po-NaOH 0,1+0,5 mol L⁻¹) e não lábeis de P (P-HCl+P-residual) (Y=mg dm⁻³) em função das doses de esterco bovino aplicadas (x=%) em cada nível de calcário (CAL) utilizado, no solo LVD..... 92

CAPÍTULO IV

Pag.

- TABELA 1.** Análise de variância para o acúmulo de matéria seca na parte aérea do feijoeiro no estágio de florescimento (MSPA-R6) no solo LVAd-2..... 113
- TABELA 2.** Modelos ajustados para o acúmulo de MSPA-R6 (y) em função da aplicação de esterco bovino (MO) e calcário (CAL), para os solos RQo, LVAd-1, LVAd-2 e LVd..... 115
- TABELA 3.** Estimativa dos parâmetros, significância e coeficientes de determinação (R^2) dos modelos ajustados apresentados na Tabela 2, e valores máximos para o acúmulo de MSPA-R6 e quantidades ótimas de esterco bovino (MO) e calcário (CAL), em cada solo..... 115
- TABELA 4.** Coeficientes de correlação linear entre produção de matéria seca da parte aérea no florescimento (MSPA-R6) e P-rem, CMAP, ITP e P-Mehlich-1, para os diferentes solos..... 116
- TABELA 5.** Modelos ajustados para o teor de P na MSPA-R6 (y) em função da aplicação de esterco bovino (MO) e calcário (CAL), para os solos RQo, LVAd-1, LVAd-2, LVd..... 120
- TABELA 6** Estimativa dos parâmetros, significância e coeficientes de determinação (R^2) dos modelos ajustados apresentados na Tabela 5, e valores máximos para o teor de P na MSPA-R6 e quantidades ótimas de esterco bovino (MO) e calcário (CAL), em cada solo..... 120
- TABELA 7.** Coeficientes de correlação linear entre teor de P na matéria seca da parte aérea no florescimento (MSPA-R6) e P-rem, CMAP, ITP e P-Mehlich-1..... 121

- TABELA 8.** Modelos ajustados para o acúmulo de MSPA-R9 (y) em função da aplicação de esterco bovino (MO) e calcário (CAL), para os solos RQo, LVAd-1, LVAd-2, LVd..... 125
- TABELA 9.** Estimativa dos parâmetros, significância e coeficientes de determinação (R^2) dos modelos ajustados apresentados na Tabela 8, e valores máximos para o acúmulo de MSPA-R9 e quantidades ótimas de esterco bovino (MO) e calcário (CAL), em cada solo..... 125
- TABELA 10.** Coeficientes de correlação linear entre produção de matéria seca da parte aérea na maturação dos grãos (MSPA-R9) e P-rem, CMAP, ITP e P-Mehlich-1..... 126
- TABELA 11.** Modelos ajustados para a produção de grãos (y) em função da aplicação de esterco bovino (MO) e calcário (CAL), para os solos RQo, LVAd-1, LVAd-2, LVd..... 130
- TABELA 12.** Estimativa dos parâmetros, significância e coeficientes de determinação (R^2) dos modelos ajustados apresentados na Tabela 11, e valores máximos para a produção de MSGR e quantidades ótimas de esterco bovino (MO) e calcário (CAL), em cada solo..... 130
- TABELA 13.** Coeficientes de correlação linear entre produção de matéria seca de grãos (MSGR) e P-rem, CMAP, ITP e P-Mehlich1... 131
- TABELA 14.** Coeficientes de correlação linear entre produção de matéria seca de grãos (MSGR) e os componentes produtivos MSPA-R6, teor de P na MSPA-R6, MSPA-R9..... 131

TABELA 15. Modelos ajustados para o acúmulo de P na MSPA-R9 + MSGR (y) em função da aplicação de esterco bovino (MO) e calcário (CAL), para os solos RQo, LVAd-1, LVAd-2, LVd. 136

TABELA 16. Estimativa dos parâmetros, significância e coeficientes de determinação (R^2) dos modelos ajustados apresentados na Tabela 15, e valores máximos para o P-acumulado e quantidades ótimas de esterco bovino (MO) e calcário (CAL), em cada solo..... 136

TABELA 17. Coeficientes de correlação linear entre quantidade acumulada de P na matéria seca total da parte aérea na maturação dos grãos (MSPA-R9 + MSGR) e P-rem, CMAP, ITP e P-Mehlich1..... 137

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

Pág.

- FIGURA 1.** Ciclagem e distribuição das formas de fósforo em um agroecossistema..... 13
- FIGURA 2.** Fracionamento sequencial das formas de fósforo do solo (adaptado de Hedley et al., 1982b)..... 16

CAPÍTULO II

- FIGURA 1.** Representação gráfica do P-rem (mg L^{-1}), em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (CAL), na forma de superfície de resposta, para os solos RQo, LVAd-1, LVAd-2 e LVd..... 43
- FIGURA 2.** Cortes horizontais sobre o espaço fatorial da superfície de resposta mostrando as isoquantas correspondentes a várias faixas de valores de P-rem (mg L^{-1}) em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (CAL)..... 44
- FIGURA 3.** Representação gráfica da CMAP (mg kg^{-1}), em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (CAL), na forma de superfície de resposta, para os solos RQo, LVAd-1, LVAd-2 e LVd..... 48
- FIGURA 4.** Cortes horizontais sobre o espaço fatorial da superfície de resposta mostrando isoquantas correspondentes a várias faixas de valores de CMAP (mg kg^{-1}) em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (CAL)..... 49
- FIGURA 5.** Representação gráfica do ITP, em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (CAL), na forma de superfície de resposta, para os solos RQo, LVAd-1, LVAd-2 e LVd..... 55

FIGURA 6. Cortes horizontais sobre o espaço fatorial da superfície de resposta mostrando isoquantas correspondentes a várias faixas de valores de ITP em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (CAL)..... 56

CAPÍTULO III

FIGURA 1. Procedimento simplificado de fracionamento seqüencial de fósforo (modificado de Hedley et al., 1982) 74

FIGURA 2. Representação gráfica do P Mehlich-1 (mg dm^{-3}), em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (CAL), na forma de superfície de resposta, para os solos RQo, LVAd-1, LVAd-2 e LVd..... 77

FIGURA 3. . Corte horizontal sobre o espaço fatorial nas superfícies de resposta mostrando isoquantas correspondentes a diferentes faixas de valores para o P Mehlich-1 (mg dm^{-3}) em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (CAL)..... 78

FIGURA 4. Teores de P (mg dm^{-3}) em amostras de solo RQo, em função da aplicação de esterco bovino, em cada nível de calcário, para as diferentes formas de fósforo..... 83

FIGURA 5. Teores de P (mg dm^{-3}) em amostras de solo LVAd-1, em função da aplicação de esterco bovino, em cada nível de calcário, para as diferentes formas de fósforo..... 85

FIGURA 6. Teores de P (mg dm^{-3}) em amostras de solo LVAd-2, em função da aplicação de esterco bovino, em cada nível de calcário, para as diferentes formas de fósforo..... 88

FIGURA 7. Teores de P (mg dm^{-3}) em amostras de solo LVd, em função da aplicação de esterco bovino, em cada nível de calcário, para as diferentes formas de fósforo..... 91

CAPÍTULO IV

Pag.

- FIGURA 1.** Representação gráfica do acúmulo de MSPA-R6 (g vaso^{-1}), em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (CAL), na forma de superfície de resposta, para os solos RQo, LVAd-1 e LVd..... 113
- FIGURA 2.** Cortes horizontais sobre o espaço fatorial da superfície de resposta mostrando isoquantas correspondentes a várias faixas de produções de MSPA-R6 (g vaso^{-1}) em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (CAL)..... 114
- FIGURA 3.** Representação gráfica do teor de P na MSPA-R6 (g kg^{-1}), em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (CAL), na forma de superfície de resposta, para os solos RQo, LVAd-1, LVAd-2 e LVd..... 118
- FIGURA 4.** Cortes horizontais sobre o espaço fatorial da superfície de resposta mostrando isoquantas correspondentes a várias faixas de valores de teor de P na MSPA-R6 (g kg^{-1}), em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (CAL)..... 119
- FIGURA 5.** Representação gráfica para o acúmulo de MSPA-R9 (g vaso^{-1}), em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (CAL), na forma de superfície de resposta, para os solos RQo, LVAd-1, LVAd-2 e LVd..... 123
- FIGURA 6.** Corte horizontal sobre o espaço fatorial da superfície de resposta mostrando as isoquantas correspondentes a várias faixas de produções de MSPA-R9 (g vaso^{-1}), em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (CAL)..... 124
- FIGURA 7.** Representação gráfica para a produção MSGR (g vaso^{-1}), em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (CAL), na forma de superfície de resposta, para os solos RQo, LVAd-1, LVAd-2 e LVd..... 128

FIGURA 8. Cortes horizontais sobre o espaço fatorial da superfície de resposta mostrando as isoquantas correspondentes a várias faixas de produções de MSGR (g vaso^{-1}), em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (CAL)..... 129

FIGURA 9. Representação gráfica do acúmulo de P na MSPA-R9 + MSGR (g vaso^{-1}), em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (CAL), na forma de superfície de resposta, para os solos RQo, LVAd-1, LVAd-2 e LVd..... 134

FIGURA 10. Cortes horizontais sobre o espaço fatorial da superfície de resposta mostrando as isoquantas correspondentes a várias faixas de acúmulo de P na MSPA-R9 + MSGR (g vaso^{-1}), em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (CAL)..... 135

RESUMO GERAL

SOUZA, Renato Ferreira de. **Dinâmica de fósforo em solos sob influência da calagem e adubação orgânica, cultivados com feijoeiro**. 2005 141p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.¹

O fósforo é um elemento essencial para a vida, representando um dos fatores de maior limitação à produção agrícola nos solos das regiões tropicais, pela sua alta capacidade de fixação e teores extremamente baixos de formas disponíveis no solo. A redução do processo de fixação de fósforo por meio do manejo do solo, como aumento do pH e teor de matéria orgânica, é uma das maneiras mais eficazes e viáveis para amenizar esse problema. Visando a avaliar a influência da calagem e adubação orgânica sobre a dinâmica de fósforo no solo e seus efeitos sobre a produtividade do feijoeiro, foram conduzidos em casa-de-vegetação do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras quatro experimentos em vasos contendo 3 dm³ de amostras dos solos Neossolo Quartzarênico órtico, textura arenosa (RQo), Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, textura média (LVAd-1), Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, textura argilosa (LVAd-2) e Latossolo Vermelho distrófico, textura muito argilosa (LVd). Foi utilizado o delineamento experimental inteiramente ao acaso, em esquema fatorial 4x5, com quatro repetições, sendo os tratamentos constituídos por 5 doses de esterco bovino (0; 2,5; 5,0; 7,5 e 10% do volume total de solo) e 4 doses de calcário (0,0; 0,5; 1 e 2 vezes a dose recomendada para atingir V=60%), nos quais foram cultivadas três plantas de feijoeiro. Foram avaliados os atributos do solo: fósforo remanescente (P-rem), capacidade máxima de adsorção de P (CMAP), índice tampão de P (ITP) e as formas de P no solo. No feijoeiro, foram avaliados as produções totais de matéria seca da parte aérea (MSPA) no florescimento e no final do ciclo, a produção de grãos (MSGR), o teor de P na MSPA no estágio de florescimento e o acúmulo total de P na MSPA + MSGR, no final do ciclo. A calagem e a adubação

¹ Comitê Orientador: Prof. Valdemar Faquin - UFPA (Orientador), Prof. Luiz Arnaldo Fernandes – NCA/UFMG

orgânica promoveram redução significativa da CMAP e aumento do P-rem e ITP nos solos. De maneira geral, a adubação orgânica promoveu incrementos de todas as formas de P no solo, principalmente naquelas pouco lábeis. A calagem e a adubação orgânica maximizaram a absorção de P pelo feijoeiro, o que refletiu em uma melhor nutrição fosfatada e maior acúmulo de matéria seca na parte aérea e, conseqüentemente, maior produção de grãos. Isso ocorreu, possivelmente, em razão de alterações nos atributos ligados ao fator capacidade de P no solo e maior disponibilidade do nutriente à absorção vegetal.

GENERAL ABSTRACT

SOUZA, Renato Ferreira de Souza. **Phosphorus dynamics in soils under the influence of liming and organic manuring, cultivated with bean plant.** 2005. 141p. Thesis (Doctor of Science in Soil Science and Plant Nutrition) – Federal University of Lavras, Lavras, MG.¹

Phosphorus is an essential element for life, representing one of the larger limiting factors of agricultural production in tropical area soils because of its high fixation capacity and extremely low levels of forms available in the soil. The reduction of the phosphorus fixation process through soil management, through an increase in the pH and organic matter level, is one of the most effective and viable ways to lessen the problem. Seeking to evaluate the influence of liming and organic manuring on phosphorus dynamics in the soil and its effects on bean plant productivity, four experiments were conducted in the greenhouse of the Soil Science Department of the Federal University of Lavras, in vases containing 3 dm³ of samples of the soils ortic Quartzarenic Neosol, sand texture, dystrophic Red-Yellow Latosol, sandy clay loam texture, dystrophic Red-Yellow Latosol, sandy clay texture and dystrophic Red Latosol, clay texture (RLd). The experimental layout used was entirely randomized, in a 4x5 factorial outline with four repetitions and the treatments consisting of five doses of bovine manure (0; 2,5; 5,0; 7,5 and 10% of the total volume of soil) and four liming levels (0,0; 0,5; 1 and 2 times the dose recommended to reach V = 60%), in which three bean plants were cultivated. The soil attributes appraised were: remaining phosphorus (P-rem), maximum adsorption capacity of P (MACP), buffering index P (PBI) and the forms of P in the soil. Appraised in the bean plant was the total production of dry matter of the aerial part at flowering (DMAP-R6) and at the end of the cycle (DMAP-R9), the production of grains (DMGR), level of P in DMAP-R6 and the total accumulation of P in DMAP-R9 + DMGR, at the end of the cycle. The liming and the organic manuring

¹ Guidance Committee: Prof. Vademar Faquin - UFLA (Adviser), Prof. Luiz Arnaldo Fernandes – NCA/UFMG

promoted significant reduction of MACP and increase of P-rem and PBI in the soils. In a general way, the organic manuring promoted increments of all the forms of P in the soil, mainly in those little unstable (less labile P forms). The liming and organic manuring maximized the absorption of P for the bean plant, which reflected in a better phosphated nutrition and larger dry matter accumulation in the aerial part and, consequently, higher grain production. That happened, possibly, due to alterations in the attributes linked to the capacity factor of P in the soil and larger availability of the nutrient for plant absorption.

CAPÍTULO I

1 INTRODUÇÃO GERAL

A distribuição geográfica dos fatores limitantes nos solos da América tropical foi levantada por Sanches & Salinas (1981), os quais citam que mais de 70% do total são solos intemperizados, ácidos, de baixa fertilidade, com toxidez por alumínio (Al) e alta capacidade de fixação de fósforo (P). No Brasil, os solos sob cerrado, predominantemente com boa topografia, mas altamente intemperizados, ácidos e de baixa fertilidade, ocupam cerca de 1,8 milhão de Km², com predominância dos Latossolos (mais de 50%) e areias quartzosas (20%) (Lopes, 1983). De maneira geral, apresentam sinais claros de degradação do ecossistema agrícola, provocada pelos sistemas tradicionais de exploração agropecuária, o que justifica a adoção de alternativas de manejo do solo menos agressivas ao ecossistema e mais sustentáveis do ponto de vista ambiental e econômico-social.

O fósforo é, certamente, a limitação nutricional mais generalizada nos solos dos trópicos (Sanches & Salinas, 1981). Essa limitação é devida à precipitação do P com Al, Fe e Ca e adsorção pelos oxidróxidos de Fe e Al, abundantes nos solos tropicais intemperizados (Novais & Smyth, 1999). Esses autores destacam, também, que a elevação do pH do solo pela calagem e pela mineralização da matéria orgânica reduz a adsorção e aumentam a disponibilidade do P às plantas. Nesse contexto, Andrade et al. (2002) demonstraram efeito benéfico da aplicação de calcário e resíduo orgânico no aproveitamento de P e produção do feijoeiro cultivado em solos de várzea.

Os componentes de uma agricultura sustentável (qualidade ambiental, produtividade vegetal e viabilidade sócio-econômica) dependem de vários processos ecológicos importantes, que são influenciados pelo uso do solo em sistema preservacionista. O conhecimento dos impactos promovidos pelo manejo sobre as características químicas, físicas e biológicas do solo contribui

para a sustentabilidade de todo o processo e o desenvolvimento de sistemas de manejo adequados às diversas situações, que irão determinar a viabilidade produtiva e sustentabilidade agropecuária ao longo dos anos. Assim, a adoção de sistemas que contemplem a correção da acidez do solo e a manutenção ou elevação do conteúdo de matéria orgânica do solo é uma prática tecnicamente desejável, já que contribui para a melhoria, ao longo do tempo, da produtividade do solo.

Objetivo-se com este experimento estudar o efeito da calagem e adubação orgânica sobre a adsorção, formas de fósforo no solo, nutrição fosfatada e produção do feijoeiro em quatro solos com teores de argila, matéria orgânica e mineralogia bastante distintos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 A adsorção de fósforo no solo

O fenômeno da retenção do P no solo, conhecido como “adsorção” ou “fixação”, é o principal fator que leva ao baixo teor disponível desse nutriente às plantas. A retenção engloba os mecanismos de precipitação do fosfato em solução com formas iônicas de Fe, Al e Ca e, principalmente, pela adsorção aos óxihidróxidos de alumínio e ferro (Parfitt, 1978; Sample et al., 1980; Novais & Smith, 1999).

A precipitação é uma reação entre íons, com formação de um novo composto definido. Nessa reação ocorre geralmente a formação de compostos pouco solúveis de P com as formas iônicas de Al, Fe e Ca. Esses compostos, ao longo dos anos, podem liberar lentamente os íons H_2PO_4^- para a solução do solo (Lindsay et al., 1962; Sanchez & Uehara, 1980).

Entretanto, o processo dominante de retenção do ânion H_2PO_4^- aos componentes do solo é um processo de adsorção (Muljadi, 1966; Fox & Kamprath, 1970; Hingston et al., 1972; Leal & Veloso, 1973; Souza et al., 1991), sendo a principal forma de fixação de P em solos ácidos de regiões tropicais e subtropicais. O processo de adsorção é um termo que indica as reações físico-químicas que ocorrem na interface sólido/solução, na qual a superfície sólida é chamada de adsorvente, e a substância, de adsorvato. Inicialmente, há adsorção do P ao solo por processo rápido mediante uma atração eletrostática (esfera externa), seguida por um processo mais lento, em que o fosfato é adsorvido à superfície dos minerais de argila (óxidos de Fe e Al), num processo de troca de ligantes do complexo de superfície, em que hidroxilas (OH⁻) e/ou moléculas de água (H₂O) previamente coordenadas aos cátions Fe⁺³

ou Al^{+3} são deslocadas pelos ions $H_2PO_4^-$, formando um novo complexo de superfície (Hingston et al., 1972; Volkweiss & Rajj, 1977). Essa é uma reação com ligação predominantemente covalente, sendo chamada de adsorção específica ou de esfera interna (Parfitt et al., 1975; Parfitt, 1978; Sanchez & Uehara, 1980; Barrow, 1985). Solos que apresentam grandes quantidades de superfícies contendo Fe ou Al têm alta capacidade de retenção de P. Em solos ácidos, os óxidos de Fe da fração argila são os principais responsáveis pela adsorção de P em relação aos minerais gibbsita e caulinita (Hingston et al., 1974; Bahia Filho, 1982; Souza et al., 1991; Curi, 1993). O P adsorvido ao Al^{+3} na superfície da gibbsita é mais lábil que aquele adsorvido ao Fe^{+3} da goethita (Hingston et al., 1974; Souza et al., 1991).

Sendo o processo de adsorção um fenômeno de superfície, várias propriedades intrínsecas e extrínsecas ao próprio solo, além do conteúdo de argila e de óxihidróxidos de Fe e Al (Singh et al., 1983; Moller & Klant, 1984; Brasil & Muraoka, 1995), influenciam os processos de retenção de P, tais como: mineralogia, superfície específica, textura, pH, PCZ, matéria orgânica, ácidos orgânicos, atividade microbiana, o tamanho médio dos constituintes mineralógicos da fração argila do solo (Souza et al., 1991), teor e qualidade dos constituintes orgânicos, cátions trocáveis, temperatura e cor do solo (Fox & Kamprath, 1971; Leal & Velloso, 1973; Rajan & Fox, 1975; Munns & Fox, 1976, Almeida Neto & Brasil Sobrinho, 1977; Bigham et al., 1978; Lopes & Cox, 1979; Nakos, 1987; Mehadi & Taylor, 1988; Brennan et al., 1994; Ker et al., 1996; Fontes & Weed, 1996). Por sua interferência no tamanho dos minerais de argila, as condições ambientais e biológicas do solo atuam de maneira bastante eficaz na capacidade de retenção de P pelos solos. (Curi & Franzmeier, 1984; Gualberto et al., 1987; Resende et al., 1988)

2.2 Calagem e a adsorção de fósforo no solo

Em solos das regiões tropicais intemperizados, denominados solos de carga variável, predominam os minerais de argila 1:1, como a caulinita e os óxidos de Fe (hematita e goethita) e Al (gibbsita). As cargas geradas por esses minerais são oriundas da quebra das bordas dos cristais que expõem OH à solução do solo e, em função do pH e da força iônica da solução, essas cargas podem sofrer protonação ou desprotonação. A densidade de carga líquida do solo pode ser positiva ou negativa, conferindo ao mesmo capacidade de troca de cátions (CTC) ou capacidade de troca de ânions (CTA). O ponto onde a CTC é igual a CTA é denominado de ponto de carga zero (PCZ). Solos com pH acima do PCZ apresentam carga líquida negativa (CTC) e aqueles com pH abaixo do PCZ possuem carga líquida positiva (CTA) (McBride, 1994). Os valores de ponto de carga zero da hematita, goethita e gibbsita são altos, situando-se em torno de 7 e 9, a caulinita apresenta PCZ em torno de 4 e 5 e a matéria orgânica apresenta PCZ ao redor de 3. A elevação do pH pela calagem a valores acima do PCZ do solo gera, portanto, carga líquida negativa e reduz o potencial de adsorção de fosfatos nesses solos.

A formação de compostos de fósforo com ferro, alumínio e cálcio é dependente do pH e da natureza e quantidade dos minerais presentes na fração argila. Em solos ácidos e com predominância de caulinita e óxidos de Fe e Al, os compostos mais importantes são os de fósforo com Fe e Al, como a strengita e a variscita. Em solos neutros ou calcários, predominam os compostos de P com cálcio, como a hidroxiapatita (Parfitt, 1978). A elevação do pH pela calagem promove aumento da concentração e da atividade dos íons OH⁻ em solução, concorrendo para uma maior quantidade de íons H₂P₀₄⁻ prontamente disponíveis para as plantas.

O aumento do pH dos solos intemperizados, que apresentam cargas dependentes de pH, reduz a adsorção do P em solução, pela repulsão entre o fosfato e a superfície adsorvente. Assim, a adsorção específica deve ser máxima em solos ácidos. Porém, resultados obtidos por Vasconcelos et al. (1974) em dois latossolos submetidos a diferentes valores de pH mostraram pequena e não consistente alteração na capacidade máxima de adsorção de P (CMAP), indicando que o processo não é tão simples. Por outro lado, o aumento do pH aumenta a proporção de íons fosfato divalente (HPO_4^{2-}) em relação à monovalente (H_2PO_4^-), que é preferencialmente adsorvida às superfícies dos óxidos (Novais & Smith, 1999). Em solos ricos em Al, a calagem pode não apresentar o efeito esperado de redução na adsorção de P, pois polímeros de hidróxidos de alumínio recém-formados, apresentam alta afinidade pelo P (Haynes, 1984).

2.3 Matéria orgânica e a adsorção de fósforo no solo

A matéria orgânica é um fator importante que afeta a adsorção de fósforo nos solos. Em sua decomposição, a matéria orgânica em produz ácidos orgânicos, gerando cargas negativas pela dissociação de grupos fenólicos e carboxílicos. A sua ligação aos sítios de carga positiva dos oxidróxidos de Fe e Al, favorece a geração de carga líquida negativa (Parfitt, 1978). Como a adsorção de P se dá, principalmente, nos sítios de carga positiva do solo, a matéria orgânica, bloqueando esses sítios, contribui para a redução na fixação desse nutriente. A adsorção dos ácidos orgânicos, dependendo de sua estrutura e carga, pode se dar com grande energia aos óxidos de Fe e Al. Outro aspecto a ser considerado, é que a matéria orgânica apresenta no solo, um efeito complexante sobre o Al, reduzindo, assim, não só a toxidez do elemento sobre as plantas (McLean & Brown, 1984), mas também a precipitação do P-Al.

Práticas de manejo do solo afetam significativamente o processo de retenção de P no solo. O efeito da rotação de culturas (Hedley et al., 1982a; Silva et al., 1997), utilização de resíduos orgânicos (Lemare et al., 1987; O'Reilly & Sims, 1995; Nziguheba et al., 1998), podem reduzir a fixação de P no solo. A adoção de sistemas de manejo do solo visando o aumento de matéria orgânica, redução do PCZ e maior atividade microbológica podem reduzir a fixação do P (Iyamuremye & Dick, 1996). Isto é, ácidos orgânicos formados pela decomposição de resíduos orgânicos compete com o fósforo pelo mesmo sítio de adsorção ocorrendo assim maior disponibilidade de fósforo (Hue, 1991). O mecanismo de bloqueio dos sítios de adsorção ocorre por ligações entre os grupos funcionais carboxílicos e as hidroxilas da superfície dos óxidos de Fe e Al (Hue, 1991; Iyamuremye & Dick, 1996).

Mesmo que solos ricos em matéria orgânica ainda apresentem uma significativa adsorção de fósforo e os efeitos do bloqueio dos componentes orgânicos sejam por pouco tempo, o efeito da matéria orgânica em retardar a adsorção de fósforo pode ser vantajosamente explorado para utilizar o máximo a aplicação de fertilizantes fosfatados (Afif et al., 1995).

O tipo de ácido e a sua quantidade dependem do substrato utilizado como fonte de carbono e das espécies de microrganismos presentes. Por exemplo, a adubação orgânica com restos vegetais de difícil decomposição como as palhas, favorece a solubilização de fosfatos insolúveis pela produção de ácidos orgânicos, formando complexos estáveis hidro-solúveis com os fosfatos e sesquióxidos de ferro e alumínio (Michoustine, 1972). Esses complexos são móveis no solo e podem chegar mais facilmente até as raízes das plantas, constituindo uma forma disponível de fósforo do solo.

A qualidade dos ácidos orgânicos é mais importante que a quantidade, sendo mais efetivos aqueles que têm propriedade de formar quelados (Sperber, 1958). Essa propriedade é característica dos hidroxiácidos, açúcares-ácidos,

compostos aromáticos, substâncias húmicas, entre outras (Nahas, 1991). Segundo Hue (1991), os grupos funcionais carboxílicos (COOH) dos ácidos orgânicos bloqueiam os sítios de adsorção de fósforo dos óxidos de ferro e alumínio. Segundo esse mesmo autor, moléculas com maior número de grupos funcionais -OH e -COOH, como o ácido málico e cítrico (uma hidroxila e duas carboxilas), são mais efetivos que o ácido acético (uma carboxila).

Ocorre uma interação bastante significativa entre o pH e a matéria orgânica do solo, afetando o processo de adsorção de P. Gerke & Hermann (1992), estudando um modelo experimental de adsorção de ortofosfato em superfícies de complexos ácidos húmicos-ferro amorfo sintético, constataram que o aumento do pH de 5,2 para 6,2 propiciou uma redução na adsorção de fósforo da ordem de 30%. Uma série de trabalhos dá suporte a essa idéia de bloqueio dos sítios de adsorção de íons por compostos orgânicos. Sibanda & Young (1986) estudaram a adsorção competitiva entre ácidos húmicos ou fúlvicos e fosfatos em dois solos tropicais. Houve uma redução significativa na adsorção de fósforo quando o conteúdo de ácido húmico foi elevado de 0,7 a 3,0%, níveis esses equivalentes a um aumento de 1,72 a 5,2% de matéria orgânica do solo. Segundo os mesmos autores, houve uma redução de 68 e 48% na adsorção de fósforo para o nível mais alto de ácido húmico (3%), respectivamente, para solos com pH 4,6 e 5,1, o que mostra que o efeito é mais pronunciado em solos mais ácidos.

Estudando a influência do oxalato e da matéria orgânica no solo na adsorção e dessorção de fosfato, Bhatti et al. (1998) observaram que a adsorção de fosfato sofreu uma redução significativa com a presença do oxalato (maior que 30%) e da matéria orgânica do solo. Marchi (2001) verificou que os ânions orgânicos (citrato e oxalato) têm grande afinidade por solos de carga variável, sendo que em geral o oxalato é mais adsorvido e tem maior afinidade que o citrato, principalmente por amostras de horizonte A.

Segundo Iyamuremye et al. (1996), o papel dos resíduos orgânicos em reduzir a fixação de fósforo não pode ser atribuído somente à formação de complexos ou quelados com ferro e alumínio. Um mecanismo adicional a ser considerado é a liberação de fosfato, sulfato, flúor e cálcio pela decomposição do resíduo. O sulfato e o flúor formam complexos com ferro e alumínio, e o cálcio pode formar compostos solúveis com o fósforo da solução do solo, prevenindo que o mesmo seja fixado.

Além de sua atuação na redução da fixação de P pelos óxidos de Fe (hematita e goethita) e Al (gibbsita) e minerais de argila, como a caulinita, contribuindo para a maior disponibilidade do mesmo para as plantas, a matéria orgânica serve como fonte de fósforo para absorção das plantas e outros organismos do solo. A forma orgânica representa uma fração apreciável de P total encontrado no solo, que pela decomposição da matéria orgânica e mineralização de fósforo pode se constituir numa fonte potencial de suprimento da demanda do nutriente. Mas, a sua disponibilidade depende do teor de P no resíduo. Segundo Novais & Smith (1999), a imobilização do P do solo torna-se maior que a mineralização do P orgânico, quando o resíduo tem menos que 0,2 % de P total. A relação C:P menor que 100 leva à mineralização do P orgânico e, quando maior que 300, leva à imobilização do P inorgânico pelos microrganismos (Iyamuremye e Dick, 1996).

A aplicação de esterco de bovinos pode, também, promover um incremento no pH do solo, que é atribuído à presença de bicarbonatos e ácidos orgânicos com grande poder tampão (Whalen et al., 2000) e redução na adsorção de P. Os teores de nitrogênio mineral, fósforo disponível, potássio, cálcio e magnésio são incrementados imediatamente após a aplicação de esterco; o mesmo não ocorre em relação aos teores de Al, Fe e CTC do solo, cujas alterações foram observadas em longo prazo (Whalen et al., 2000).

2.4 Formas de fósforo no solo

O fósforo no solo pode ser dividido em quatro categorias: fósforo na forma iônica e em compostos na solução do solo; fósforo adsorvido na superfície dos constituintes mineralógicos do solo; minerais cristalinos e amorfos de fósforo; e componentes da matéria orgânica (Barber, 1984). Desta forma são assim consideradas três frações no solo, ou seja, fósforo em solução, fósforo lábil e o fósforo não lábil (Raij, 1991). Ocorrem, também, reações de fixação de fosfato por minerais de argila que apresentam grupos OH expostos, tais como caulinita, que apresenta alta capacidade de fixação de P. O íon fosfato reage rapidamente com o octaedro de Al pela substituição dos grupos OH localizados na superfície do mineral, em condições de solo ácido.

No solo, o P ocorre nas formas orgânicas (Po) e inorgânicas (Pi) com diferentes graus de estabilidade ou solubilidade e, portanto, com diferentes graus de disponibilidade. No solo P inorgânico pode encontrar-se em solução (P-solução); precipitado com Al, Fe ou Ca (P precipitado) ou adsorvido aos óxidos de Fe e Al da fração argila (P adsorvido) ambos em equilíbrio com a solução e compõem a fração lábil de P no solo (P-lábil). A fração não lábil é composta pelo P sob a forma de compostos de baixa solubilidade (P mineralogicamente estável) ou adsorvido às partículas do solo, não estando, estas formas, em equilíbrio imediato com o P em solução (Larsen, 1967) (Figura 1)

O P na solução do solo pode ocorrer em diferentes formas, a maioria das quais aniônicas, derivadas da desprotonação (perdas de prótons H^+) da molécula do ácido ortofosfórico (H_3PO_4) em função do pH do solo. Com a elevação do pH, prevalecem as formas aniônicas $H_2PO_4^-$ (fosfato diácido), HPO_4^{2-} (fosfato monoácido) ou PO_4^{3-} (fosfato) (Kamprath, 1977; Volkweiss & Raij, 1977; Sanchez & Uehara, 1980; Bahia Filho, 1982; Raij, 1991). Em solos das regiões

tropicais com pH em torno de 4,5 e 5,5, predomina o ânion H_2PO_4^- (ortofosfato diácido) (Shriver & Atkins, 2003).

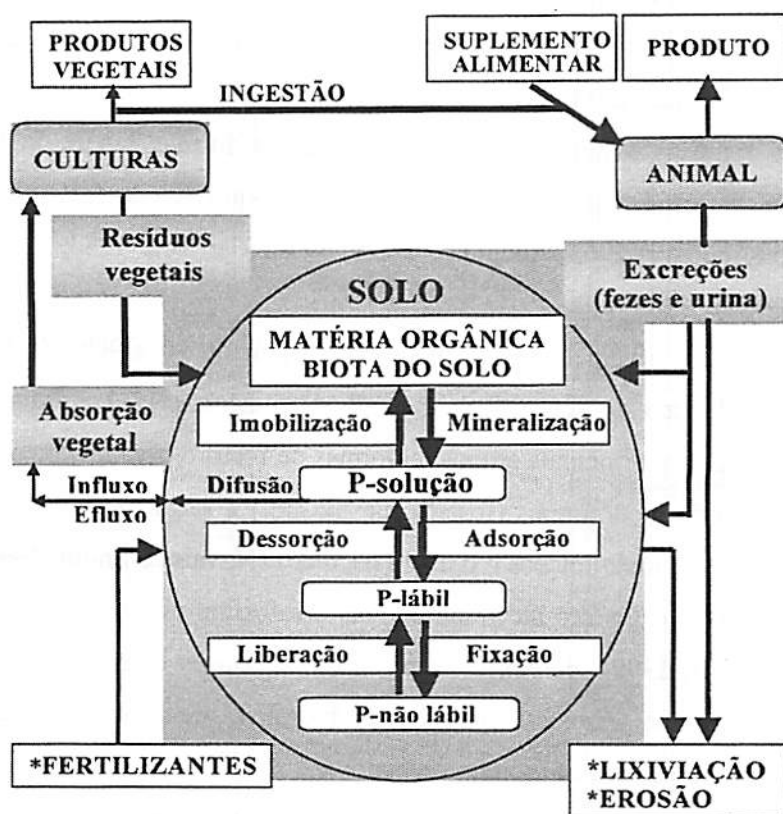


FIGURA 1: Ciclagem e distribuição das formas de fósforo em um agroecossistema (adaptado de Novais & Smyth, 1999)

As transformações do P no solo combinam os processos de reciclagem relativamente rápida entre os componentes biológicos com um ciclo geoquímico, em que as transformações ocorrem de forma bastante lenta. Os processos geoquímicos, em vários ecossistemas naturais, podem determinar a distribuição do P em longo prazo, mas, em curto prazo, os processos biológicos influenciam essa distribuição, pois grande parte do fósforo disponível às plantas é proveniente da matéria orgânica (Smeck, 1985; Walbridge, 1991). Processos biológicos regulam o movimento e distribuição de formas lábeis de P, e a reciclagem da forma orgânica é importante para disponibilidade desse elemento às plantas (Acquaye, 1963; Adeptu & Corey, 1976; Harrison, 1982; Stewart & Tiessen, 1987).

O fósforo orgânico do solo pode representar de 30 a 90% do P total, dependendo do tipo do solo, ou de 1 a 3% da matéria orgânica (Moreira & Siqueira, 2002). Os principais grupos ou formas de fósforo orgânico do solo são os ortofosfato de monoésteres (fosfatos de inositol) e ortofosfato de diésteres (ácidos nucleicos, fosfolipídeos e o ácido teicóico) (Novais & Smith, 1999). As plantas absorvem o fósforo na forma de íons ortofosfato dissolvido na solução do solo (Santos, 1999), porém, a excreção de fosfatases pelas raízes e pelos microrganismos na rizosfera permite a hidrólise de fosfatos orgânicos disponibilizando-os para a absorção vegetal.

Estudos têm demonstrado que a natureza e a dinâmica da matéria orgânica e a ciclagem de P apresentam comportamentos diferentes sob diferentes sistemas de uso do solo (Turrión, 2000), ou seja, as práticas de cultivo influenciam o comportamento da matéria orgânica e, conseqüentemente, das formas de fósforo no solo. Vários trabalhos visando a entender a dinâmica do P no solo têm mostrado a influência de diferentes práticas, fontes ou doses de matéria orgânica, e sistemas de cultivo sobre as transformações e mudanças das formas de P (Thompson & Black, 1970; Hedley et al., 1982a; O'Halloran et al.,

1987; Pavan & Leal, 1995; Pavan & Filho, 1995; Iyamuremye et al., 1996; Beck & Sanchez, 1996; Nziguheba et al., 1998; Tokura et al., 2002).

2.5 Fracionamento das formas de fósforo

Dada a complexidade do comportamento do fósforo no solo, uma abordagem usada para a compreensão de sua dinâmica é subdividi-lo em frações, pelo uso de soluções extratoras de diferentes composições e capacidades de extração (Silva & Raij, 1999; Novais & Smith, 1999). O uso do solo, as remoções de P pelas culturas e as aplicações de fertilizantes fosfatados alteram a dinâmica das transformações do P no solo (Tiessen et al., 1992). Em cafeeiro cultivado em Latossolo Roxo distrófico, Pavan & Chaves (1996) atribuíram aos aumentos do pH e matéria orgânica os principais efeitos nas transformações de P no solo.

O fracionamento do P do solo tem sido utilizado para estudar essas transformações (Chang & Jackson, 1957; Hedley et al., 1982a). Diversas metodologias de fracionamento têm sido desenvolvidas e adaptadas para o estudo das formas de P no solo, onde a extração seqüencial remove primeiramente as formas de P lábeis, seguida pelas formas pouco lábeis e não lábeis, ou seja, as formas mais estáveis de P são extraídas por meio de tratamentos mais drásticos (Tiessen & Moir, 1993). A metodologia de fracionamento proposto por Chang & Jackson (1957) extrai várias formas de P inorgânico (P-H₂O; P-Al; P-Fe e P-Ca), inclusive o P fortemente retido, não sendo, porém, apropriado para estudos de dinâmica de P disponível para absorção vegetal. Já o método proposto por Hedley et al. (1982b), que fraciona o P em cinco formas de P_i, três de P_o, e o P residual (Beck & Sanchez, 1994), tem como vantagem o fato de relacionar as formas de P no solo à sua disponibilidade para as plantas, além de quantificar o P orgânico lábil no solo (Figura 2).

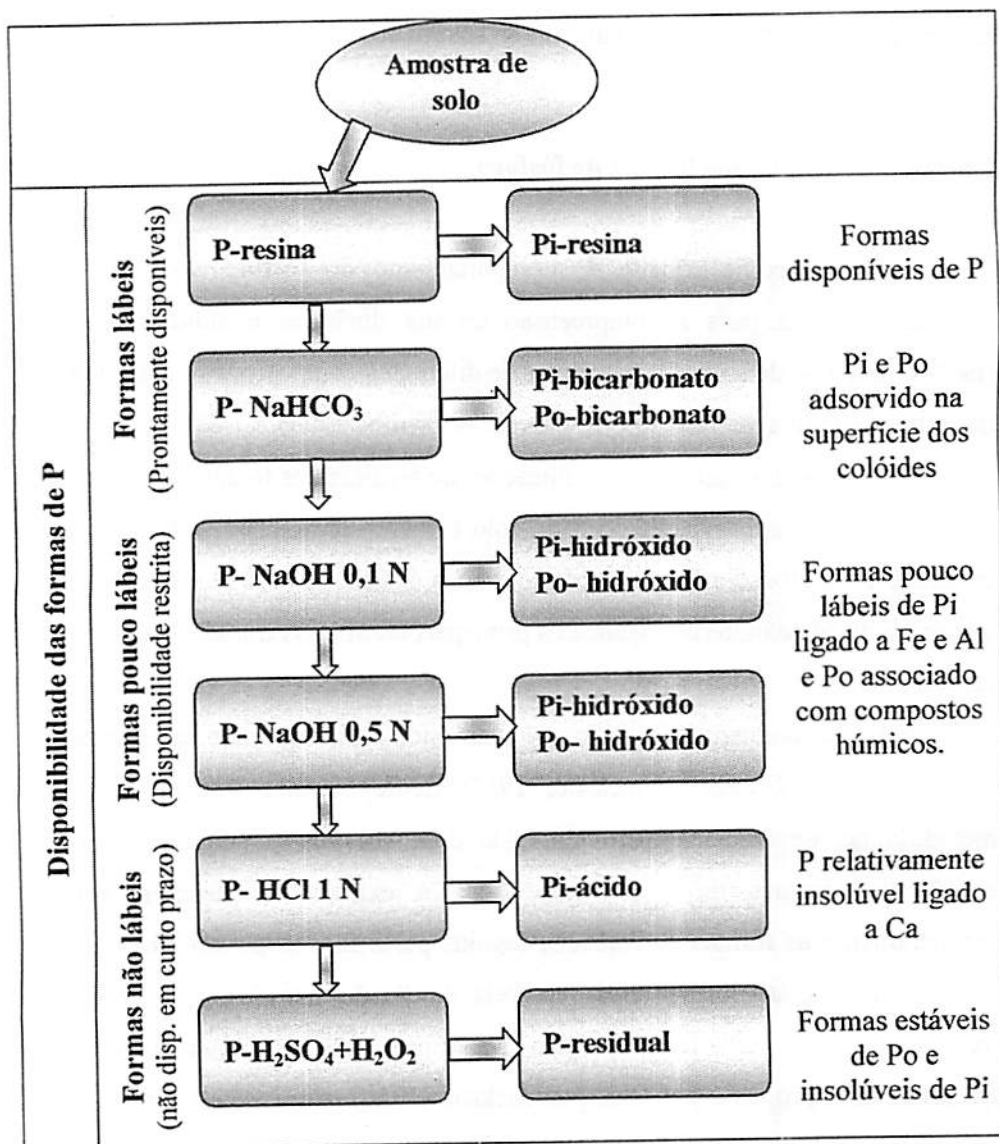


FIGURA 2: Fracionamento seqüencial das formas de fósforo do solo (adaptado de Hedley et al., 1982b).

As formas lábeis referem-se ao P disponível (P-resina) e ao P inorgânico (Pi) e orgânico (Po) adsorvido na superfície dos colóides (Pi e Po-NaHCO₃). As formas pouco lábeis referem-se às formas inorgânicas ligadas a Fe e Al e orgânicas associadas aos compostos húmicos (Pi e Po-NaOH). O P orgânico (Po- NaHCO₃ e Po-NaOH) constitui uma fração de P obtida pela diferença entre o P determinado antes e após a quebra das células microbianas por autoclavagem de parte do extrato por uma hora a 120° C. As formas consideradas não lábeis correspondem ao P ligado a Ca (P-HCl) e ao P residual (P-H₂SO₄ + H₂O₂), referente às formas mais estáveis de Po e às formas insolúveis de Pi, sendo muito resistente à decomposição (Daroub et al., 2000).

O método proposto por Hedley et al. (1982b) possibilita o entendimento da dinâmica das formas inorgânicas e orgânicas de P, e pode ser empregado em experimentos que envolvam utilização de matéria orgânica ou uso de diferentes práticas ou sistemas de manejo do solo (Hedley et al., 1982a; O'Halloran et al., 1987; Tiessen & Moir, 1993; Beck & Sanchez, 1994 e 1996; Pavan & Leal, 1995; Pavan & Filho, 1995; Cross & Schlesinger, 1995; Iyamuremye et al., 1996; Pavan & Chaves, 1996; Nziguheba et al., 1998; Rheinheimer et al., 2000; Fernandes et al., 2002; Tokura, 2002; Silva et al., 2003).

3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACCIOLLY, L. J. O.; DAL BÓ, M. A.; ALVAREZ V., V. H.; RIBEIRO, A. C. Métodos para determinação do potencial de sulfato em solos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 9, n. 2, p. 103-106, maio/ago. 1985.

ACQUAYE, D. K. Some significance of soil organic phosphorus mineralization in the phosphorus nutrition of cocoa in Ghana. *Plant and Soil*, Dordrecht, v. 19, n. 1, p. 65-80, 1963.

ADEPETU, J. A.; COREY, R. B. organic phosphorus as a predictor of plant available phosphorus in soils of Southern Nigeria. *Soil Science*, Baltimore, v. 122, n. 2, p. 159-164, Aug. 1976.

AFIF, E.; BARRÓN, V.; TORRENT, J. Organic matter delays but does not prevent phosphate sorption by cerrado soils from Brazil. *Soil Science*, Baltimore, v. 159, n. 3, 207-211, Mar. 1995.

ALMEIDA NETO, J. X. de; BRASIL SOBRINHO, O. C. do. Fixação de fósforo em três solos sob cerrado de Goiás. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 1, p. 12-15, jan./abr. 1977.

ANDRADE, A. T.; FERNANDES, L. A.; FAQUIN, V. Organic residue, limestone, gypsum, and phosphorus adsorption by lowland soils. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v. 59, n. 2, p. 349-355, abr./jun. 2002.

BAHIA FILHO, A. F. C. Índices de disponibilidade de fósforo em Latossolos do planalto central com diferentes características texturais e mineralógicas. 1982. 179 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

BARBER, S. A. *Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach*. New York: Wiley Interscience, 1984. 398 p.

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

BECK, M. A.; SANCHEZ, P. A. Soil phosphorus fraction dynamics during 18 years of cultivation on a Typic paleudult. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 58, n. 5, p. 1424-1431, Sept./Oct. 1994.

BECK, M. A.; SANCHEZ, P. A. Soil phosphorus movement and budget after 13 years of fertilized cultivation in the Amazon basin. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 184, n. 1, p. 23-31, 1996.

BHATTI, J. S.; COMERFORD, N. B.; JOHNSTON, C. T. Influence of oxalate and soil organic matter on sorption and desorption of phosphate onto a Spodic Horizon. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 62, n. 4, p. 1089-1095, July/Aug. 1998.

BIGHAM, J. M.; GOLDEN, D. C.; BUOL, S. W.; WEED, S. D.; BOWEN, L. H. Iron oxide mineralogy of well-drained ultisols: II. Influence on color, surface area, and phosphate retention. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 42, n. 5, p. 825-830, Sept./Oct. 1978.

BRENNAN, R. F.; BOLLAND, M. D.; JEFFERY, R. C.; ALLEN, D. G. Phosphorus adsorption by a range of western Australian soils related to soil properties. **Communications Soil Science plant Analysis**, New York, v. 25, n. 15/16, p. 2785-2795, 1995.

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

CROSS, A. F.; SCHLESINGER, W. H. A literature review and of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems. **Geoderma**, Amsterdam, v. 64, n. 2/4, p. 197-214, Jan. 1995.

CURI, N. Mineralogia e sua relação com o comportamento dos solos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 24., 1993, Goiânia, GO. Resumos... Goiânia: SBCS, 1993. p. 27.

CURI, N.; FRANZMEIER, D. P. Toposequence of oxisols from the Central Plateau of Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 48, n. 2, p. 341-346, Mar./Apr. 1984.

DAROUB, S. H.; PIERCE, F. J.; ELLIS, B. G. Phosphorus Fractions and Fate of Phosphorus-33 in Soils under Plowing and No-Tillage. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 64, n. 1, p. 170-176, Jan./Feb. 2000.

FERNANDES, L. A.; FAQUIN, V.; FURTINI, A. E.; CURI, N. Formas de fósforo em solos de várzea e biodisponibilidade para o feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 3, p. 373-383, mar. 2002.

FERREIRA, M. M.; DIAS JUNIOR, M de S. Estabilidade de agregados In: **Roteiro das aulas práticas de Física do solo**. Lavras: UFLA, 1996.

FONTES, M. P. F.; WEED, S. B. Phosphate adsorption by clays from Brazilian Oxisols: relationships with specific surface area and mineralogy. **Geoderma**, Amsterdam, v. 72, n. 1/2, p. 37-51, July 1996.

FOX, R.; KÄMPRATH, E. J. Adsorption and leaching of P in acid organic soils and high organic matter sand. **Soil Science Society America Proceedings**, Madison, v. 35, n. 1, p. 154-156, Jan./Feb. 1971.

FOX, R.; KÄMPRATH, E. J. Phosphate sorption isotherms for evaluating the phosphate requirement of soils. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 34, n. 6, p. 902-907, Nov./Dec. 1970.

GERKE, J.; HERMANN, R. Adsorption of orthophosphate to humic-Fe-complexes and to amorphous Fe-oxide. **Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde**, Deerfield Beach, v. 155, n. 3, p. 233-236, June 1992.

GUALBERTO, V.; RESENDE, M.; CURL, N. Química e mineralogia de Latossolos com altos teores de ferro, da Amazônia e do Planalto Central. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Campinas, v. 11, n. 3, p. 252-254, set./dez. 1987.

HARRISON, A. F. Labile organic phosphorus mineralization in relation to soil properties. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 14, n. 4, p. 343-351, 1982.

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

HEDLEY, M. J.; STEWART, J. W. B.; GHANUHAN, B. S. Changes in inorganic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and laboratory incubations. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 46, n. 4, p. 970-976, July/Aug. 1982.

HEDLEY, M. J.; WHITE, R. E.; NYE, P. H. Plant-induced changes in the rhizosphere of rape (*Brassica napus* var emerald) seedlings. III. Changes in L value, soil phosphate fractions and phosphatase activity. **New Phytologist**, Cambridge, v. 91, n. 1, p. 45-56, 1982.

- HEILMAN, M. D.; CARTER, D. L.; GONZALES, C. L. The ethylene glycol monoethyl ether (EMEG) technique for determining soil surface area. *Soil Science*, Baltimore, v. 100, p. 409-413, 1965.
- HINGSTON, F. J.; POSNER, A. M.; QUIRK, J. P. Anion adsorption by goethite and gibbsite. I. The role of the proton in determining adsorptions envelopes. *Journal of Soil Science*, Oxford, v. 23, n. 2, p. 177-192, June 1972.
- HINGSTON, F. J.; POSNER, A. M.; QUIRK, J. P. Anion adsorption by goethite and gibbsite. II. Desorption of anions from hydrous oxide surfaces. *Journal of Soil Science*, London, v. 25, n. 1, p. 16-26, Mar. 1974.
- HUE, N. V. Effects of organic acids/anions on P sorption and phytovailability in soils with different mineralogies. *Soil Science*, Baltimore, v. 152, n. 6, p. 463-471, Dec. 1991.
- IYAMUREMYE, F.; DICK, R. P. Organic amendments and phosphorus sorption by soils. *Advances in Agronomy*, New York, v. 56, p. 139-185, 1996.
- IYAMUREMYE, F.; DICK, R. P.; BAHAN, J. Organic amendments and phosphorus dynamics: II. Distribution of soil phosphorus fractions. *Soil Science*, Baltimore, v. 161, n. 7, p. 436-443, July 1996.
- KÄMPRATH, E. J. Phosphorus fixation and availability in weathered soils. In: SIMPÓSIO SOBRE CERRADO, BASES PARA UTILIZAÇÃO AGROPECUÁRIA, 4., 1976, Brasília. *Anais...* São Paulo: EDUSP, 1977. p. 333-347.
- KER, J. C.; FONTES, M. P. F.; SOUZA, A. R.; RESENDE, M. Adsorção de fósforo em alguns solos latossólicos: relação entre mineralogia e efeito da calagem. *Revista Ceres*, Viçosa, v. 43, n. 246, p. 216-226, mar./abr. 1996.
- LARSEN, S. Soil phosphorus. *Advances in Agronomy*, New York, v. 19, p. 151-211, 1967.
- LEAL, J. R.; VELOSO, A. C. X. Adsorção de fosfato em Latossolo sob vegetação de cerrado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 8, p. 81-88, 1973.
- LEMARE, P. H.; PEREIRA, J.; GOEDERT, W. J. Effects of green manure on isotopically exchangeable phosphate in a dark-red latosol in Brazil. *Journal of Soil Science*, Oxford, v. 38, n. 2, p. 199-209, June 1987.

LINDSAY, W. L.; FRAZIER, A. W.; STEPHENSON, H. F. Identification of reaction products from phosphate fertilizers in soils. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 26, n. 5, p. 446-452, Sept./Oct. 1962.

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

LOPES, A. S.; COX, F. R. relação de características físicas, químicas e mineralógicas com fixação de fósforo em solos sob cerrados. **Revista brasileira de do Solo**, Campinas, v. 3, n. 2, p. 82-88, maio/ago. 1979.

MARCHI, G. **Interações de ânions orgânicos e inorgânicos com solos de carga variável**. 2001. 75 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

McBRIDE, M. B. **Environmental chemistry of soils**. New York: Oxford University Press, 1994. 406 .

McLEAN, E. O.; BROWN, J. R. Crop response to lime in the Midwestern United State. In: ADAMS, F. (Ed.). **Soil acidity and liming**. 2. ed. Madison: ASA/CSSA/SSA, 1984. p. 267-304.

MEHADI, A. A.; TAYLOR, R. W. Phosphate adsorption by two highly-weathered soils. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v. 52, n. 3, p. 627-632, May/June 1988.

MICHOUSTINE, E. N. Processus microbiologiques mobilisant les composés du phosphore dans le sol. **Revue d'Écologie et de Biologie du Sol**, Montrouge, v. 9, p. 521-528, 1972.

MOREIRA, F. M. S. e SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. Lavras: Editora UFLA, 2002. 626 p.

MUNNS, D. N.; FOX, R. L. The slow reaction which continues phosphate adsorption: kinetics and equilibrium in some tropical soils. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v. 40, n. 1, p. 46-51, Jan./Feb. 1976.

NAHAS, E. **Ciclo do fósforo: transformações microbianas**. Jaboticabal: FUNEP, 1991. 67 p.

NAKOS, G. phosphorus adsorption by Forest soils. **Communications Soil Science Plant Analysis**, New York, v. 18, n. 3, p. 279-286, 1987.

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

NZIGUHEBA, G.; PALM, C. A.; BURESH, R. J.; SMITHSON, P. C. Soil phosphorus fractions and adsorption as affected by organic and inorganic sources. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 198, n. 2, p. 159-168, Jan. 1998.

O'HALLORAN, I. P.; STEWART, J. W.; JONG, E. de. Changes in forms and available as influenced by management practices. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 100, n. 1/3, p. 113-126, 1987.

O'RELLY, S. E.; SIMS, J. T. Phosphorus adsorption and desorption in a sandy soil amended with high rates of coal fly ash. **Communications Soil Science Plant Analysis**, New York, v. 26, n. 17/18, p. 2983-2993, 1995.

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

PARFITT, R. L.; ATKINSON, R. J.; SMART, R. S. T. C. the mechanism of phosphate fixation by iron oxides. **Soil Science Society America Proceedings**, Madison, v. 39, n. 5, p. 837-841, Sept./Oct. 1975.

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, maio/ago. 1996.

PAVAN, M. A.; FILHO, A. A. fracionamento de fósforo em um experimento de manejo e fertilidade do solo para a produção de café no noroeste do Paraná. **Arquivos de Biologia e tecnologia**, Curitiba, v. 38, n. 1, p. 157-165, jan./mar. 1995.

PAVAN, M. A.; LEAL, A. C. Utilização de uma técnica de fracionamento para caracterizar formas de fósforo em solo incubado com resíduos de leucena. **Arquivos de Biologia e Tecnologia**, Curitiba, v. 38, n. 1, p. 375-383, jan./mar. 1995.

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

RAJAN, S. S. S.; FOX, R. L. Phosphate adsorption by soils: II. Reactions in tropical acid soils. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 39, n. 5, p. 846-851, Sept./Oct. 1975.

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

SANCHEZ, P.; SALINAS, J. G. Low-input technology for managing oxisols and ultisols in tropical America. *Advances in Agronomy*, New York, v. 34, p. 278-406, 1981.

SANCHEZ, P.; UEHARA, G. management considerations for acid soils with high phosphorus fixation capacity. In: KHASAWNEH, P. H.; SAMPLE, E. C.; KAMPRATH, E. J. (Ed.). *The role of phosphorus in agriculture*. Madison: America Society of agronomy, 1980. p. 471-514.

SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O. (Ed.). *Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais*. Porto Alegre: Gênese, 1999. 491 p.

SIBANDA, H. M.; YOUNG, S. D. Competitive adsorption of humic acids and phosphate on goethite, gibbsite and two tropical soils. *Journal of Soil Science*, Oxford, v. 37, n. 2, p. 197-204, June 1986.

SHRIVER, D. F.; ATKINS, P. W. *Química inorgânica*. Tradução Maria Aparecida Gomes. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2003. 816 p.

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

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.

SINGH, R.; MOLLER, M. R. F.; FERREIRA, W. de A. Características da sorção do fósforo relacionadas com propriedades selecionadas de solos dos trópicos úmidos da Amazônia. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 7, p. 233-241, 1983.

SMECK, N. E. Phosphorus dynamics in soils and landscapes. **Geoderma**, Amsterdam, v. 36, n. 3/4, p. 185-199, Dec. 1985.

SOUZA, J. A.; CURTI, N.; GUEDES, G. A. A. Relação entre mineralogia e adsorção-dessorção de fósforo em alguns Latossolos sob cerrado do Planalto central. **Ciência e Prática**, Lavras, v. 15, n. 1, p. 103-111, jan./mar. 1991.

SPERBER, J. I. The incidence of apatite-solubilizing organisms in the rhizosphere and soil. **Australian Journal of Agricultural Research**, East Melbourne, v. 9, p. 778-781, 1958.

STEWART, J. W. B.; TIESSSEN, H. Dynamics of soil organic phosphorus. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 4, n. 1, p. 41-60, 1987.

THOMPSON, E. J.; BLACK, C. A. change in extractable organic phosphorus in soil in the presence and absence of plants – III. Phosphatase effects. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 32, p. 335-348, 1970.

TIESSSEN, H.; MOIR, J. O. Characterization of available P by sequential extraction. In: CARTER, M. R. (Ed.) **Soil Sampling and Methods of Analysis** part 2. Boca Raton: Lewis, 1993. p. 75-86.

TIESSSEN, H.; SALCEDO, I. H.; SAMPAIO, E. V. S. B. Nutrients and soil organic matter dynamic under shifting cultivation in semi-arid northeastern Brazil. **Agriculture Ecosystems Environment**, Amsterdam, v. 39, n. 3, p. 139-159, 1992.

TOKURA, A. M.; FURTINI NETO, A. E.; CURTI, N.; FAQUIN, V.; KURIHARA, C. H.; ALOVISI, A. A. Formas de fósforo sob plantio direto em razão da profundidade e tempo de cultivo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 10, p. 1467-1476, out. 2002.

TURRIÓN, M. B.; GLASER, B.; SOLOMON, D. Effects of deforestation on phosphorus pools in mountain soils of the Alay Range, Khyrgyzia. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 31, n. 5, p. 134-142, July 2000.

VASCONCELLOS, C. A.; BRAGA, J. M.; NOVAIS, R. F.; PINTO, O. C. B. Fósforo em dois Latossolos do Estado de Mato Grosso: I Sorção de fosfato. **Experientiae**, Viçosa, v. 18, n. 11, p. 267-285, dez. 1974.

VOLKWEISS, S. J.; RAIJ, B. van. Retenção e disponibilidade de fósforo em solos. In: SIMPÓSIO SOBRE CERRADO, BASES PARA UTILIZAÇÃO AGROPECUÁRIA, 4., 1976, Brasília. Anais... São Paulo: EDUSP, 1977. p. 317-332.

WALBRIDGE, M. R. Phosphorus availability in acidic organic soils of the lower North Carolina coastal plain. Ecology, Washington, v. 72, n. 6, p. 2083-2100, Dec. 1991.

WHALEN, J. K.; CHANG, G.; CLAYTON, G. W.; CAREFOOT, J. P. Cattle manure amendments can increase the pH of acid soils. Soil Science Society of America Journal, Madison, v. 64, p. 962-966, 2000. 2000.

CAPÍTULO II

ADSORÇÃO DE FÓSFORO EM SOLOS SOB INFLUÊNCIA DA CALAGEM E ADUBAÇÃO ORGÂNICA

RESUMO

SOUZA, Renato Ferreira de. Adsorção de fósforo em solos sob influência da calagem e adubação orgânica. In: ____ **Dinâmica de fósforo em solos sob influência da calagem e adubação orgânica, cultivados com feijoeiro**. 2005. p. 27-63. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.¹

O fósforo é a limitação nutricional mais generalizada nos solos das regiões tropicais devido a sua precipitação com Al, Fe e Ca e adsorção aos oxidróxidos de Fe e Al, abundantes nesses solos intemperizados. Entretanto, práticas de manejo do solo, como a calagem e a adubação orgânica, são bastante efetivas na redução da adsorção e aumento da disponibilidade do P para absorção vegetal. Nesse contexto, visando a avaliar o efeito da calagem e adição de matéria orgânica sobre a adsorção de fósforo no solo, foram conduzidos em casa-de-vegetação do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras quatro experimentos no delineamento inteiramente ao acaso, no esquema fatorial 4x5, com quatro repetições. Os tratamentos foram constituídos por 5 doses de esterco bovino (0; 2,5; 5,0; 7,5 e 10% do volume total de solo) e 4 níveis de calagem (0,0; 0,5; 1 e 2 vezes a dose recomendada para atingir V=60%), aplicados em amostras dos solos Neossolo Quartzarênico órtico (RQo), Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico textura média (LVAd-1), Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico textura argilosa (LVAd-2) e Latossolo Vermelho distrófico textura muito argilosa (LVd). Foram avaliados os teores de fósforo remanescente (P-rem), capacidade máxima de adsorção de P (CMAP) e índice tampão de P (ITP) dos solos. A calagem e a adubação orgânica promoveram a redução da CMAP e aumento do P-rem e ITP. Esses valores foram condicionados à mineralogia e textura, sendo a adsorção de P incrementada com o caráter oxidico dos solos estudados. Com esses resultados, demonstra-se a importância da adoção de sistemas de manejo que contemplem a correção da acidez e elevação dos teores de matéria orgânica dos solos para a otimização do uso do fósforo pelas culturas.

¹ Comitê Orientador: Prof. Valdemar Faquin - UFLA (Orientador), Prof. Luiz Arnaldo Fernandes – NCA/UFMG.

ABSTRACT

SOUZA, Renato Ferreira de. Adsorption of phosphorus in soils under the influence of liming and organic manuring. In: ____ **Phosphorus dynamics in soils under the influence of liming and organic manuring**. 2005. p. 27-63. Thesis (Doctor of Science in Soil Science and Plant Nutrition) – Federal University of Lavras, Lavras, MG.¹

Phosphorus is the nutritional limitation most widespread in the soils of tropical areas due to its precipitation with Al, Fe and Ca and adsorption to the oxy-hydroxides of Fe and Al, abundant in these weathered soils. However, soil management practices, such as liming and organic manuring, are quite effective in adsorption reduction and the increase of the readiness of P for plant absorption. In that context, seeking to evaluate the effect of liming and addition of organic matter on the adsorption of phosphorus in the soil, four experiments in an entirely randomized layout, in a 4x5 factorial outline with four repetitions were done in the greenhouse of the Soil Science Department of the Federal University of Lavras. The treatments were made up of five doses of bovine manure (0; 2,5; 5,0; 7,5 and 10% of the total volume of soil) and four liming levels (0,0; 0,5; 1 and 2 times the dose recommended to reach V=60%), applied in samples of 3 dm³ of ortic Quartzarenic Neosol sand texture, dystrophic Red-Yellow Latosol sandy clay texture, dystrophic Red-Yellow Latosol sandy clay loam texture and dystrophic Red Latosol clay texture soils. Appraised were the levels of remaining phosphorus (P-rem), maximum adsorption capacity of P (MACP) and the buffering index of P (PBI) of the soils. The liming and organic manuring promoted the reduction of MACP and increase in the P-rem and PBI. Those values were conditioned to the mineralogy and texture, the P adsorption being increased with the oxidic character of the soils. Those results demonstrate the importance of the adoption of soil management systems that contemplate the correction of acidity and elevation of organic matter levels to optimize the use of the phosphorus for the cultures.

¹ Guidance Committee: Prof. Valdemar Faquin - UFLA (Adviser), Prof. Luiz Arnaldo Fernandes – NCA/UFGM.



1 INTRODUÇÃO

Os solos das regiões tropicais possuem alta capacidade de fixação de P (adsorção e precipitação), sendo essa característica influenciada por fatores intrínsecos e extrínsecos ao próprio solo. Dentre esses fatores, destacam-se a mineralogia, a textura, o pH, o balanço de cargas, a matéria orgânica, o tipo de ácidos orgânicos e atividade microbiana do solo.

Em solos tropicais intemperizados, predominam os minerais de argila 1:1, como a caulinita e os óxidos de Fe (hematita e goethita) e Al (gibbsita). O processo de adsorção de P pelos óxidos, hidróxidos e oxidróxidos de ferro e alumínio é um dos principais fatores envolvidos na fixação de P nesses solos (Lopes & Cox, 1979). Ocorrem, também, reações de fixação de fosfato por minerais de argila que apresentam grupos OH expostos, tais como a caulinita, que apresenta alta capacidade de fixação de P. Em condições de solo ácido, o íon fosfato reage rapidamente com o octaedro de Al pela substituição dos grupos OH localizados na superfície do mineral, formando complexos de esfera interna. As cargas negativas geradas por esses minerais de argila são oriundas da quebra dos bordos dos cristais que expõem OH à solução do solo.

Em função do pH e da força iônica da solução, essas cargas podem sofrer protonação ou desprotonação. A densidade de carga líquida do solo pode ser positiva ou negativa, conferindo ao mesmo capacidade de troca de cátions (CTC) ou capacidade de troca de ânions (CTA). O ponto onde a CTC é igual a CTA é denominado de ponto de carga zero (PCZ). Solos com pH acima do PCZ apresentam carga líquida negativa (CTC) e aqueles com pH abaixo do PCZ possuem carga líquida positiva (CTA) (McBride, 1994). Os valores de ponto de carga zero da hematita, goethita e gibbsita são altos, situando-se em torno de 7 e 9. A caulinita apresenta PCZ em torno de 4 e 5 e a matéria orgânica apresenta PCZ ao redor de 3. A redução dos valores do PCZ promovidos pelo aumento do

conteúdo de matéria orgânica no solo ou a elevação do seu pH pela calagem concorre para a redução das cargas líquidas positivas (CTA) de solos oxidicos, reduzindo, assim, a capacidade de fixação de fosfatos desses solos.

Os grupos funcionais carboxílicos ou fenólicos, presentes na matéria orgânica, são responsáveis pelo bloqueio dos sítios de carga positiva dos óxidos de Fe e Al, onde ocorre o processo de adsorção do P, reduzindo drasticamente sua fixação. O mecanismo de bloqueio dos sítios de adsorção ocorre por ligações entre os grupos funcionais carboxílicos ou fenólicos e as hidroxilas expostas na superfície dos óxidos de Fe e Al. (Hue, 1991)

O manejo a que o solo é submetido, alterando os fatores envolvidos na adsorção de P no solo, pode aumentar ou reduzir a fixação de P. A adoção de sistemas de manejo do solo visando ao aumento de matéria orgânica, aumento do pH e uma maior atividade da microbiota do solo pode interferir no processo, reduzindo a fixação do P.

Objetivou-se com este trabalho avaliar o efeito da adição de esterco bovino e calcário sobre a adsorção de fósforo em quatro solos com diferentes texturas, mineralogia e teor de matéria orgânica.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização e amostragem dos solos

Os experimentos foram realizados em amostras de quatro solos bem drenados, predominantes no Estado de Minas Gerais e com ampla variação nos teores de argila, mineralogia e matéria orgânica (MO). Para abranger uma ampla variação nas características físicas, químicas e mineralógicas, foram utilizados os solos classificados no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 1999) como: Neossolo Quartzarênico órtico fase cerrado (RQo), Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico textura média fase floresta tropical subperenifólia (LVAd-1), Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico textura argilosa fase floresta tropical subperenifólia (LVAd-2) e Latossolo Vermelho distrófico textura muito argilosa fase floresta tropical subperenifólia (LVd). O solo RQo foi coletado no município de Itutinga-MG (coordenadas UTM: x: 0540201 e y: 7644073 - 23K), o LVAd-1 proveniente do município de Itumirim-MG (coordenadas UTM: x: 0521106 e y: 7646097 - 23K), o LVAd-2 (coordenadas UTM: x: 0504202 e y: 7652821 - 23K) e o LVd (coordenadas UTM: x: 0503646 e y: 7652507 - 23K), foram coletados no Campus da Universidade Federal de Lavras, Lavras-MG.

As amostras dos solos foram coletadas na camada de 0-20 cm de profundidade, sob vegetação natural, tomando-se o cuidado de retirar a vegetação e restos orgânicos presentes na superfície. Essas amostras foram destorroadas, secas ao ar e tamisadas em peneira com malha de 4 mm de abertura. Ao mesmo tempo, foram tomadas subamostras dos diferentes materiais de solo, passadas em peneira de 2 mm de abertura, para caracterização física, química e mineralógica da fração terra fina seca ao ar (TFSA).

2.2. Caracterização física, química e mineralógica dos solos

A granulometria dos solos foi determinada pelo método da pipeta (Day, 1965), empregando-se NaOH 0,1 mol L⁻¹ como dispersante químico e agitação rápida, sendo a fração areia (2 - 0,053 mm) separada por meio de tamisagem.

O pH em água, Ca, Mg, Al, P, K, Cu, Fe, Mn e Zn foi determinado conforme EMBRAPA (1997), sendo o Ca, Mg e Al extraídos com KCl 1 mol L⁻¹, e P, K e os micronutrientes catiônicos pelo HCl 0,05 mol L⁻¹ + H₂SO₄ 0,0125 mol L⁻¹ (Mehlich 1). Também foram determinados a acidez potencial (H+Al) e carbono orgânico, conforme Raij et al. (1987). O fósforo remanescente foi determinado conforme Alvarez V. et al. (2000).

Na fração argila, foram quantificadas caulinita (Ct) e gibbsita, (Gb) mediante Análise Termo-Diferencial (ATD), sendo as amostras da mesma fração submetidas à difração de raios-X (método do pó) (Klug & Alexander, 1974), óxidos de ferro livre totais (Fe_d), usando o ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (DCB) (Mehra & Jackson, 1960) e óxidos de ferro menos cristalinos (Fe_o) extraídos segundo metodologia de Schwertmann (1964), usando-se oxalato ácido de amônio, e em ambos os casos a determinação do ferro foi realizada por espectrofotometria de absorção atômica (Krishna Murti et al., 1966). Os óxidos foram determinados pelo ataque sulfúrico (SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, TiO₂ e P₂O₅), segundo EMBRAPA (1997) e determinadas as relações moleculares $K_i = \text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ e $K_r = \text{SiO}_2/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$. Os valores das caracterizações físicas, químicas e mineralógicas dos solos constam na Tabela 1.

SOLOS			
	RQo	LVAd-1	LVAd-2
Químicos			
pH em água	5,2	5,2	4,9
Al ³⁺ (cmolc dm ⁻³)	0,8	0,6	0,8
Ca ²⁺ (cmolc dm ⁻³)	0,4	0,5	0,8
Mg ²⁺ (cmolc dm ⁻³)	0,1	0,2	0,2
K ⁺ (mg dm ⁻³)	25	74	52
H ⁺ + Al ³⁺ (cmolc dm ⁻³)	4,0	4,0	6,3
P-Mehlich-1 (mg dm ⁻³)	7,5	2,0	2,3
P-resina (mg dm ⁻³)	17,5	10,3	8,1
P-rem (mg L ⁻¹)	26,8	24,4	17,4
B (mg dm ⁻³)	0,3	0,3	0,3
Cu (mg dm ⁻³)	0,6	0,9	1,3
Fe (mg dm ⁻³)	91,3	85,9	175,7
Mn (mg dm ⁻³)	12,5	7,3	8,2
Zn (mg dm ⁻³)	1,8	2,4	5,5
SB (cmolc dm ⁻³)	0,6	0,9	1,1
t (cmolc dm ⁻³)	1,4	1,5	1,9
T (cmolc dm ⁻³)	4,6	4,9	7,4
V (%)	12,7	18,4	15,3
m (%)	58	40	41
MO (dag kg ⁻¹)	1,4	1,9	2,6
Físicos			
Areia (dag kg ⁻¹)	92	69	52
Silte (dag kg ⁻¹)	2	8	8
Argila (dag kg ⁻¹)	6	23	40
Mineralógicos			
SiO ₂ (g kg ⁻¹)	30,6	95,1	137,6
Al ₂ O ₃ (g kg ⁻¹)	35,8	97,4	203,9
Fe ₂ O ₃ (g kg ⁻¹)	11,0	36,2	53,9
TiO ₂ (g kg ⁻¹)	4,7	6,2	11,2
P ₂ O ₅ (g kg ⁻¹)	0,0	0,0	0,4
Fe ₂ (g kg ⁻¹)	2,0	10,8	44,5
Fe ₃ (g kg ⁻¹)	0,1	0,1	5,8
Cl (g kg ⁻¹)	778,0	752,0	535,6
Gb (g kg ⁻¹)	59,0	63,0	202,3
K _i (SiO ₂ /Al ₂ O ₃)	0,85	0,98	0,67
K _r (SiO ₂ /Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃)	0,65	0,71	0,53
SiO ₂ (g kg ⁻¹)	129,8	137,6	129,8
Al ₂ O ₃ (g kg ⁻¹)	319,1	203,9	319,1
Fe ₂ O ₃ (g kg ⁻¹)	171,8	53,9	171,8
TiO ₂ (g kg ⁻¹)	22,0	11,2	22,0
P ₂ O ₅ (g kg ⁻¹)	0,9	0,4	0,9
Fe ₂ (g kg ⁻¹)	101,6	44,5	101,6
Fe ₃ (g kg ⁻¹)	9,2	5,8	9,2
Cl (g kg ⁻¹)	292,7	535,6	292,7
Gb (g kg ⁻¹)	358,8	202,3	358,8
K _i (SiO ₂ /Al ₂ O ₃)	0,41	0,67	0,41
K _r (SiO ₂ /Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃)	0,26	0,53	0,26

TABELA 1. Principais atributos químicos, físicos e mineralógicos de amostras dos solos coletadas na camada de 0 a 20 cm, antes da aplicação dos tratamentos.

2.3. Delineamento experimental e tratamentos

Quatro experimentos, um com cada solo, foram conduzidos em casa-de-vegetação do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras (UFLA), utilizando-se o delineamento experimental inteiramente casualizado (DIC), com os tratamentos em esquema fatorial 4x5 e quatro repetições, sendo cada unidade experimental (parcela) constituída por um vaso com capacidade de quatro dm³ de solo. Os tratamentos foram constituídos de cinco doses de esterco bovino curtido (0, 100, 200, 300 e 400 cm³), correspondendo a 0,0; 2,5; 5,0; 7,5 e 10% do volume de solo de cada parcela experimental e quatro doses de calcário, equivalentes a 0,0; 0,5; 1,0 e 2,0 vezes as doses recomendadas para elevar a saturação por bases em cada solo a 60%, segundo CFSEMG (1999), correspondentes às doses constantes na Tabela 2. Utilizou-se um calcário dolomítico calcinado e micropulverizado, com 35% de CaO, 14% de MgO e PRNT de 100%. A análise química do esterco bovino mostrou os seguintes teores dos nutrientes: N: 18,0 g kg⁻¹; P: 3,37 g kg⁻¹; K: 14,23 g kg⁻¹; Ca: 12,13 g kg⁻¹; Mg: 5,99 g kg⁻¹; S: 2,61 g kg⁻¹; Cu: 21,95 mg kg⁻¹; Fe: 11012,76 mg kg⁻¹; Mn: 449,36 mg kg⁻¹; Zn: 78,51 mg kg⁻¹.

Para sua incorporação ao solo, o esterco bovino foi moído (1 mm² de dimensão) e seco a 60 °C. Em amostras suficientes de 4 dm³ de cada solo, incorporaram-se as doses de esterco e de calcário, as quais foram incubadas por 30 dias com umidade próxima à capacidade de campo.

Ao final do período de 30 dias de incubação, foram coletadas amostras de solo de cada parcela experimental para a determinação de fósforo remanescente (P-rem), da capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP) e de dessorção de P e estimativa do índice tampão de fósforo (ITP). Para as determinações analíticas, as amostras foram secas ao ar e passadas em peneira de 2 mm de malha.

TABELA 2. Doses de calcário aplicadas às diferentes classes de solos.

Níveis de calagem ⁽¹⁾	Classes de solos							
	RQo		LVAd-1		LVAd-2		LVd	
	Mg ha ⁻¹	g dm ⁻³	Mg ha ⁻¹	g dm ⁻³	Mg ha ⁻¹	g dm ⁻³	Mg ha ⁻¹	g dm ⁻³
0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,5	1,09	0,54	1,02	0,51	1,65	0,83	3,17	1,59
1,0	2,18	1,09	2,04	1,02	3,31	1,65	6,35	3,17
2,0	4,35	2,18	4,08	2,04	6,62	3,31	12,69	6,35

⁽¹⁾ Vezes as doses recomendadas para elevar a saturação por bases (V) a 60%.

O P-rem foi determinado na solução de equilíbrio solo - solução, obtida pela agitação de 5 cm³ de TFSA com 50 mL de uma solução de CaCl₂ 10 mmol L⁻¹ contendo 60 mg L⁻¹ de P, por uma hora (Alvarez V. et al., 2000). Após centrifugar e filtrar, o P na solução de equilíbrio foi dosado pelo método da vitamina C, modificado por Braga & Defelipo (1974). Como o valor do P remanescente apresenta uma estreita correlação com a capacidade tampão de fosfato e com a capacidade máxima de adsorção de fosfato (Resende, 1983; Muniz, 1983; Bahia Filho & Braga, 1975; Fonseca, 1987; Alvarez V. & Fonseca, 1990; Fernández, 1995; Ker, 1995), o mesmo foi usado para verificar alterações na capacidade de fixação dos fosfatos durante o período experimental.

Para a determinação da capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP) (Olsen & Watanabe, 1957), os solos foram separados em função do fósforo remanescente, estabelecendo-se as doses de P para cada solo, segundo

Alvarez V. et al. (2000), para a confecção das isotermas de adsorção (0,0; 0,1; 0,25; 0,45; 0,70 e 1,0 vez a concentração máxima de P em cada solo).

Na determinação do P adsorvido, 2,5 cm³ de TFSA foram agitados por 24 horas com 25 mL de uma solução de CaCl₂ 10 mmol L⁻¹ contendo P nas concentrações estabelecidas para cada solo (RQo e LVAd-1: 0 a 80 mg L⁻¹; LVAd-2: 0 a 110 mg L⁻¹ e LVd: 0 a 150 mg L⁻¹). Após centrifugação e filtragem, o P da solução de equilíbrio foi dosado colorimetricamente (Braga & Defelipo, 1974). A diferença entre a quantidade inicial de P na solução e a quantidade na solução de equilíbrio foi considerada como sendo o P adsorvido. Os valores de P adsorvido foram ajustados à equação de Langmuir para estimar a CMAP, de acordo com a equação:

$$\frac{x}{m} = \frac{kbC}{(1+kC)}$$

em que:

x/m = fósforo adsorvido ao solo, em mg P (x)/g solo (m)

k = constante relacionada com a energia de ligação do P (L mg⁻¹)

b = CMAP do solo (mg g⁻¹)

C = concentração de P na solução de equilíbrio, em mg L⁻¹

Para a obtenção das estimativas das constantes k e b , utilizou-se a forma linearizada da equação de Langmuir:

$$\frac{C}{x/m} = \frac{1}{kb} + \frac{C}{b}$$

Nas mesmas amostras de solo, após a centrifugação e retirada do sobrenadante, foram adicionados 30 mL de CaCl₂ 10 mmol L⁻¹ e agitado por 24 horas. Após esse período, a mistura solo/solução foi novamente centrifugada e

filtrada e o P do sobrenadante dosado por colorimetria, para determinação do P dessorvido. Equações de regressão quadrática foram ajustadas entre o P adsorvido e o P dessorvido nas diferentes concentrações de P adicionadas para cada tratamento. A partir do inverso dos coeficientes “*b*” ($1/b$) das equações, foram estimados os índices tampão de P (ITP), conforme Accioly et al. (1985), modificado por Guilherme et al. (2000) para o P. O ITP representa a resistência do solo a mudanças do P lábil como consequência de alterações no P da solução. Quanto menores os valores de ITP maior a resistência de liberação de P da fração lábil para a solução do solo (Fox & Kamprath, 1970; Holford & Mattingly, 1976; Laverdière & Karan, 1984).

Os valores das variáveis P-rem, CMAP e ITP foram submetidos ao ajuste de modelos de regressão múltipla (superfícies de resposta) em função das doses de calcário e de esterco bovino aplicadas (Khuri & Cornell, 1996 e Alvarez V., 1994). A adoção do sistema linear formado pelas derivadas parciais das equações da superfície de resposta igualada a zero fornece os valores críticos, que corresponde aos valores máximos, mínimos ou nenhum deles, de acordo com o comportamento específico da variável em estudo. Sobre o espaço fatorial na superfície de resposta foram feitos cortes horizontais, obtendo-se isoquantas correspondentes a vários níveis de valores da variável resposta em função das variáveis explicativas. Foi utilizado o programa de análises estatísticas R (R Development Core Team, 2004)

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os modelos ajustados, para todas as variáveis, foram selecionados conforme o procedimento stepwise, isto é, considerando-se um modelo geral (completo), selecionou-se um modelo menor (submodelo), o qual forneceu uma boa explicação da variável resposta em função das variáveis explicativas (Khuri & Cornell, 1996). O procedimento stepwise permitiu a seleção de modelos por meio dos quais todos os parâmetros foram significativos.

3.1 Fósforo remanescente (P-rem)

Em geral, os valores mais altos de P-rem foram obtidos para as doses mais altas de esterco bovino (MO) (dose 10 ou próximas de 10 %) e doses intermediárias de calagem (CAL), com exceção do solo LVAd-2, em que as respostas mais altas foram obtidas em doses baixas de calagem (CAL) e alta de esterco bovino (MO). Esses resultados podem ser observados nas Figuras 1 e 2 e nas Tabelas 3 e 4. Na Figura 2, verificam-se cortes horizontais sobre o espaço fatorial na superfície de resposta mostrando as isoquantas correspondentes a diversas faixas de valores de P-rem. Na Tabela 4, são apresentadas as estimativas e R^2 dos parâmetros dos modelos matemáticos ajustados e ponto de máximo para os valores de P-rem.

Pelas Figuras 1 e 2 verifica-se que houve uma tendência geral de aumento nos valores de P-rem em função da adição de esterco bovino e calagem com resposta quadrática. Nas maiores doses de MO, o P-rem apresentou um comportamento quadrático em função das doses de calcário, passando por um máximo em doses intermediárias e redução nas doses mais elevadas do

corretivo.. No solo LVAd-1, na dose zero de MO, a resposta à aplicação de calcário foi insignificante ou negativa nas doses altas de calagem.

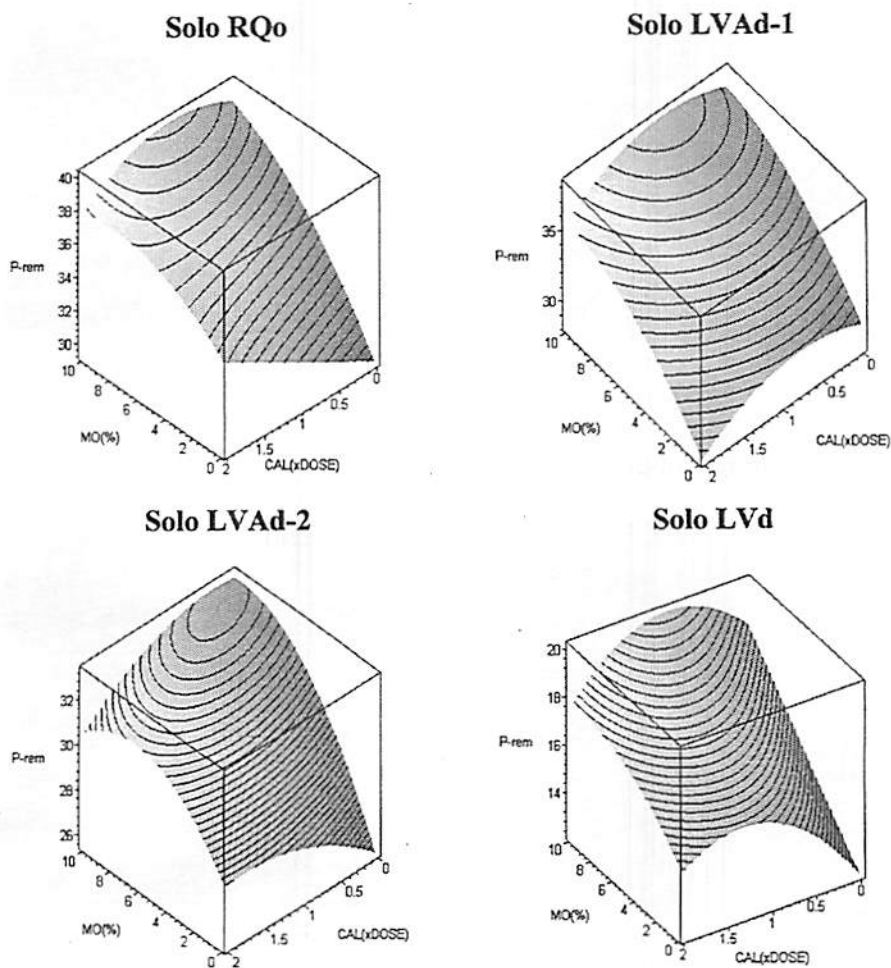


FIGURA 1. Representação gráfica do P-rem (mg L^{-1}), em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (CAL), na forma de superfície de resposta, para os solos RQo, LVAd-1, LVAd-2 e LVd.

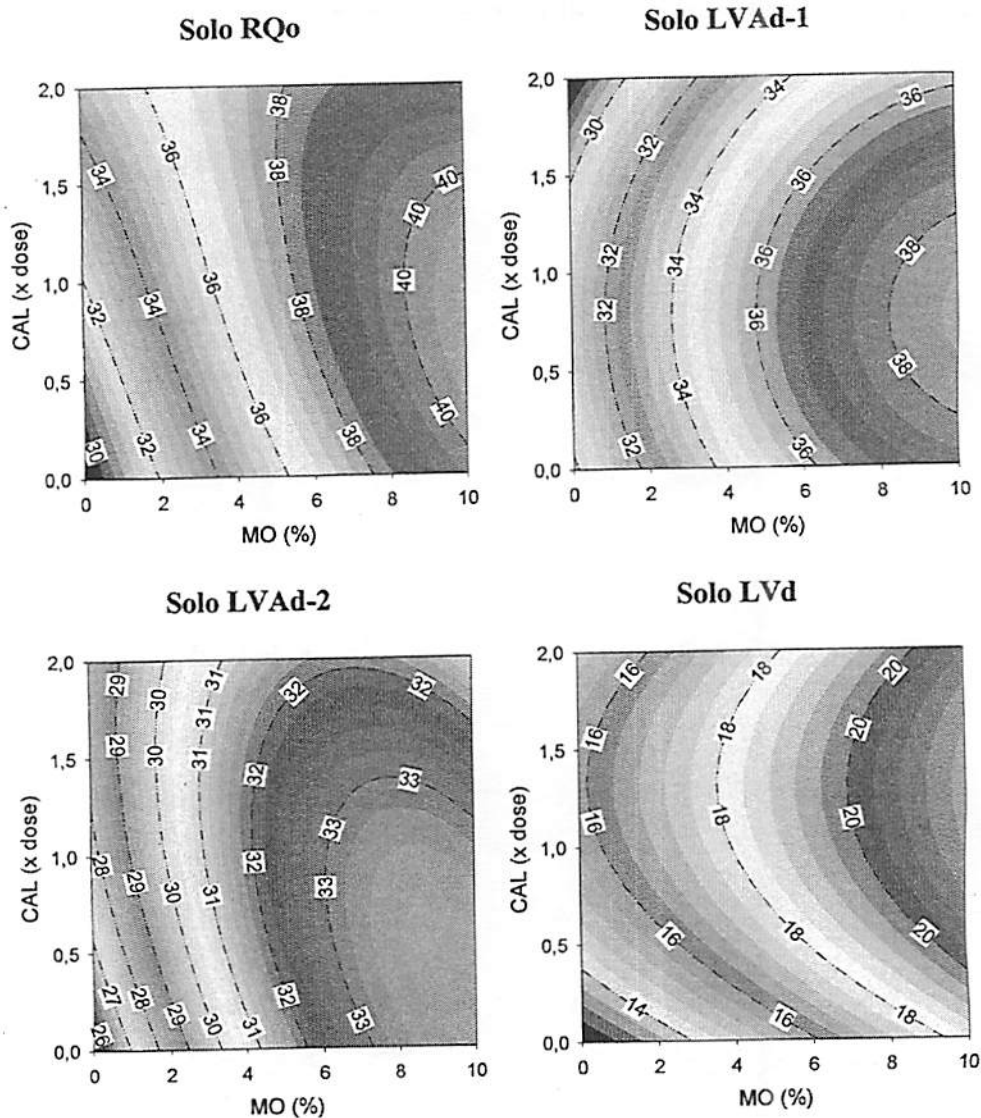


FIGURA 2. Cortes horizontais sobre o espaço fatorial da superfície de resposta mostrando as isoquantas correspondentes a várias faixas de valores de P-rem (mg L^{-1}) em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (CAL).

TABELA 3. Modelos ajustados para o P-rem (y) em função da aplicação de esterco bovino (MO) e calcário (CAL), para os solos RQo, LVAd-1, LVAd-2, LVd.

Solo	Modelo ajustado
RQo	$y = \beta_0 + \beta_1 MO + \beta_2 CAL + \beta_3 MO^2 + \beta_4 MO * CAL^2$
LVAd-1	$y = \beta_0 + \beta_1 MO + \beta_2 CAL + \beta_3 MO^2 + \beta_4 CAL^2$
LVAd-2	$y = \beta_0 + \beta_1 MO + \beta_2 CAL + \beta_3 MO^2 + \beta_4 CAL^2 + \beta_5 MO * CAL$
LVd	$y = \beta_0 + \beta_1 MO + \beta_2 CAL + \beta_3 CAL^2 + \beta_4 CAL * MO^2$

TABELA 4. Estimativa dos parâmetros, significância e coeficientes de determinação (R^2) dos modelos ajustados apresentados na Tabela 3, e valores máximos para o P-rem e quantidades ótimas de esterco bovino (MO) e calcário (CAL), em cada solo.

Parâmetro	SOLOS			
	RQo	LVAd-1	LVAd-2	LVd
β_0	29,25(0,38)***	29,81(0,39)***	25,52(0,36)***	12,22(0,29)***
β_1	1,54(0,145)***	1,36(0,15)***	1,61(0,12)***	0,62(0,04)***
β_2	2,69(0,29)***	2,79(0,72)***	3,11(0,60)***	5,52(0,52)***
β_3	-0,05(0,02)***	-0,06(0,01)***	-0,08(0,01)***	-2,08(0,23)***
β_4	-0,16(0,02)***	-1,82(0,33)***	-0,89(0,26)***	-0,02(0,01)***
β_5	-	-	-0,26(0,04)***	-
R^2	86,99 %	84,18 %	83,63 %	83,21 %
P-rem (máx.)	40,70 mg L ⁻¹	38,48 mg L ⁻¹	33,69 mg L ⁻¹	21,82 mg L ⁻¹
(MO; CAL)	(10,00; 0,61)	(10,00; 0,77)	(8,95; 0,42)	(10,00; 1,27)

***: Significativo a 0,1 %.

A elevação dos valores de P-rem com o aumento das doses de MO podem ser atribuídos ao bloqueio dos sítios de adsorção de fósforo no solo, onde os grupos funcionais carboxílicos e fenólicos da matéria orgânica se ligam às hidroxilas dos óxidos de Fe e Al (Hue, 1991). A calagem, além de neutralizar o Fe e Al trocáveis, eleva o pH do solo, fazendo com que haja um balanço de cargas negativas no solo (McBride, 1994). Porém, tanto nas doses altas de esterco bovino quanto nos níveis altos de calagem houve uma tendência de redução nos valores de P-rem. Isso ocorre, possivelmente, devido à adsorção de P aos compostos húmicos, dado o caráter aniônico da MO que, por via de pontes de cátions (Al, Fe e Ca) a ela adsorvidos, retém o P (Novais & Smyth, 1999). Também, de acordo com esses autores, com uma elevada dose de calcário e presença de muito Ca trocável, pode ocorrer a precipitação de P, formando compostos de baixa estabilidade na forma de P-Ca.

Por esses resultados, pode-se inferir que práticas de manejo do solo que aumentem a matéria orgânica do solo podem ser uma alternativa para a maximização da adubação fosfatada, principalmente para pequenos agricultores que possuem dificuldades para aquisição de fertilizantes químicos ou para cultivo orgânico.

Embora os valores de P-rem tenham aumentado em todos os solos com a aplicação de resíduo e calcário, esse aumento foi diferenciado entre os solos estudados. Os menores valores de P-rem foram verificados nos solos mais argilosos, com maiores teores de Fe_o, gibbsita e matéria orgânica e menores valores de Ki e Kr (Tabela 1), uma vez que os ânions orgânicos interferem na cristalização dos óxidos de Fe e Al (Gol & Huang, 1985). Por outro lado, verifica-se que nesses solos o aumento relativo dos valores de P-rem foi maior que nos solos mais arenosos. A adição de resíduo orgânico e calcário promovendo o surgimento de cargas negativas e precipitação de Fe e Al

trocáveis em solução e bloqueio dos sítios de adsorção de P pelos grupos funcionais COOH da matéria orgânica, reduzem o potencial de fixação de fosfatos, principalmente nos solos mais argilosos.

Verificou-se neste trabalho uma correlação negativa e significativa (-0,99*) entre o P-rem e a CMAP. Como a determinação do P-rem é menos trabalhosa que o da CMAP e, segundo CFMSG (1999), obrigatório na análise de rotina, o mesmo pode ser usado como um indicativo bastante confiável da CMAP em solos.

3.2 Capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP)

Verificou-se uma redução significativa nos valores da CMAP devido ao aumento nas doses de MO e calagem. Em geral, para todos os solos, os menores valores da CMAP foram observados nas combinações de altas doses de esterco bovino com as doses baixas ou intermediárias de calcário (Figuras 3 e 4). Para o solo RQo, o aumento das doses de calcário não proporcionou uma alteração significativa da CMAP, quando se aplicou a maior dose de esterco bovino. O solo LVAd-2 apresentou os menores valores de CMAP com as doses menores de calcário combinadas com dose alta de esterco bovino. Esses resultados são concordantes com os obtidos por Iyamuremye et al. (1996), que verificaram efeitos positivos da MO e calcário sobre a redução dos valores de CMAP no solo. No solo LVAd-1, ocorreu uma brusca redução inicial da CMAP até as doses intermediárias de matéria orgânica (3 até 7 %), que apresentou um patamar com valores constantes em torno de 300 mg kg⁻¹, ocorrendo, em seguida, uma nova queda nos valores com as doses de esterco a partir de 7 %.

Na Figura 4, com cortes horizontais sobre o espaço fatorial na superfície de resposta, observam-se isoquantas correspondentes a várias faixas de valores de CMAP. Nas Tabelas 5 e 6 são mostrados os modelos matemáticos ajustados

para a CMAP, com respectivas estimativas e significância dos parâmetros e R^2 dos modelos e ponto de menor valor da variável estudada.

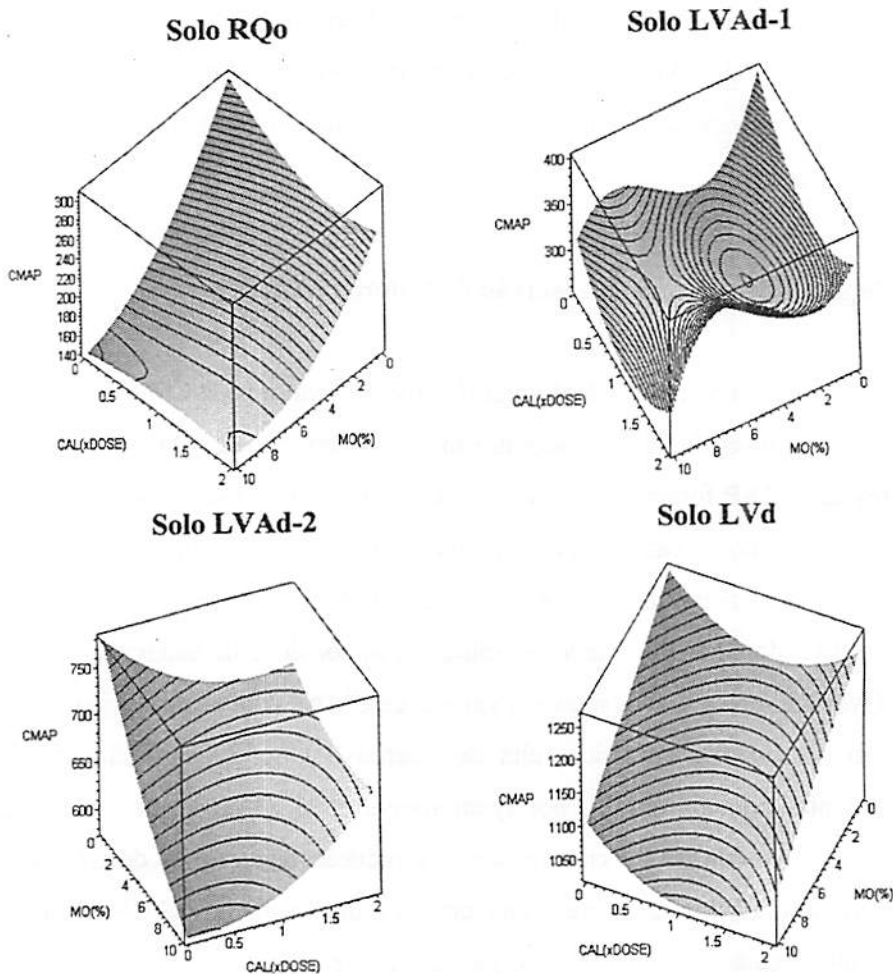


FIGURA 3. Representação gráfica da CMAP (mg kg^{-1}), em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (CAL), na forma de superfície de resposta, para os solos RQo, LVAd-1, LVAd-2 e LVd.

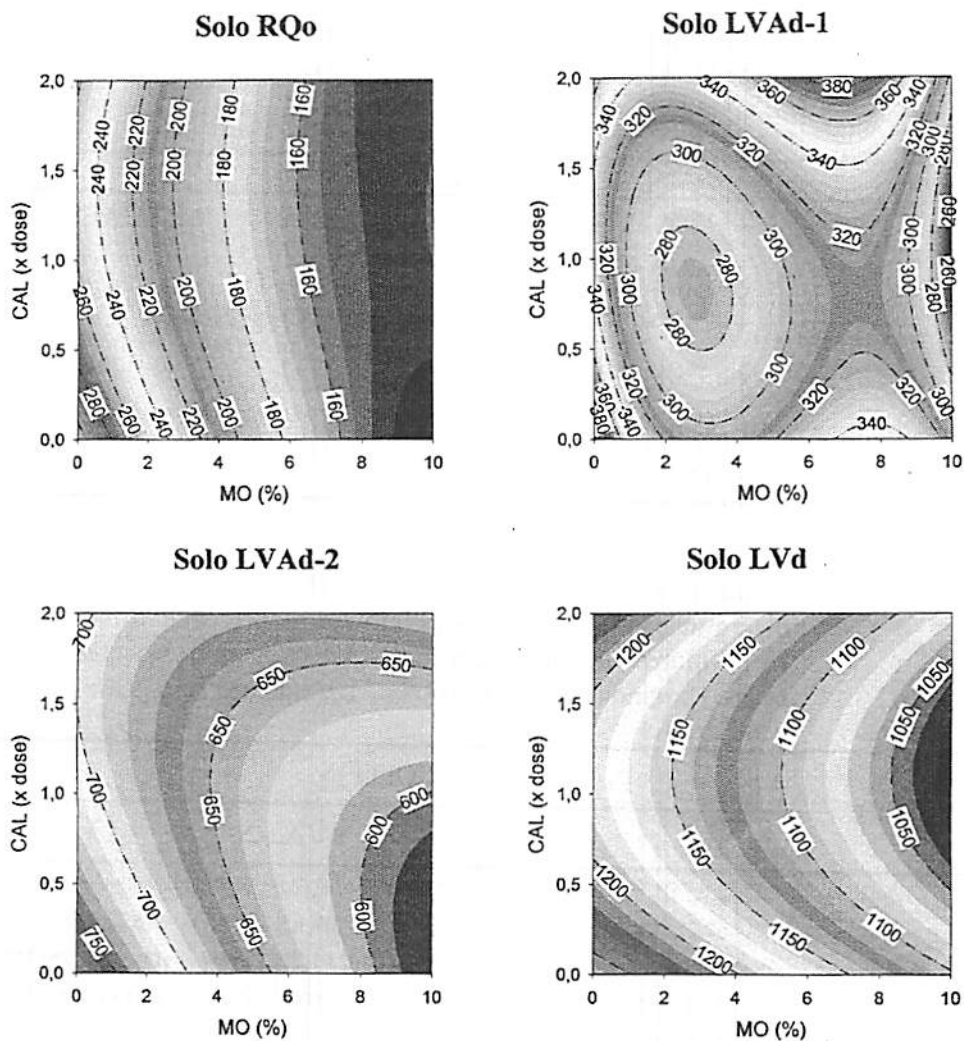


FIGURA 4. Cortes horizontais sobre o espaço fatorial da superfície de resposta mostrando isoquantas correspondentes a várias faixas de valores de CMAP (mg kg^{-1}) em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (CAL).

TABELA 5. Modelos ajustados para a CMAP (y), em função da aplicação de esterco bovino (MO) e calcário (CAL), para os solos RQ, LVAD-1, LVAD-2 e LVP.

Solo	Modelo ajustado
RQ	$y = \beta_0 + \beta_1 MO + \beta_2 CAL + \beta_3 (MO)^2 + \beta_4 (CAL)^2 + \beta_5 (MO \cdot CAL) + \beta_6 MO \cdot (CAL)^2$
LVAD-1	$y = \beta_0 + \beta_1 MO + \beta_2 CAL + \beta_3 (MO)^2 + \beta_4 (CAL)^2 + \beta_5 (MO)^3 + \beta_6 (MO \cdot CAL) + \beta_7 (MO)^2 \cdot CAL$
LVAD-2	$y = \beta_0 + \beta_1 MO + \beta_2 CAL + \beta_3 (MO)^2 + \beta_4 (CAL)^2 + \beta_5 (MO \cdot CAL)$
LVP	$y = \beta_0 + \beta_1 MO + \beta_2 CAL + \beta_3 (CAL)^2$

TABELA 6. Estimativa dos parâmetros, significância e coeficientes de determinação (R^2) dos modelos ajustados apresentados na Tabela 5, e valores mínimos para a CMAP e quantidades ótimas de esterco bovino (MO) e calcário (CAL), em cada solo.

Parâmetro	RQ	LVAD-1	LVAD-2	LVP
β_0	307,32(6,76)***	402,49(10,39)***	781,08(13,07)***	1266,98(13,34)***
β_1	-29,44(2,12)***	-67,69(7,52)***	-28,09(4,37)***	-16,32(1,58)***
β_2	-78,02(16,14)***	-113,35(16,14)***	-102,01(21,72)***	-146,64(27,26)***
β_3	1,29(0,18)***	14,54(1,73)***	0,79(0,39)*	66,19(12,64)***
β_4	27,82(7,49)***	47,71(6,66)***	31,74(9,37)**	-
β_5	9,45(2,64)***	-0,87(0,11)***	9,02(1,59)***	-
β_6	-3,4231(1,22)**	16,19(3,98)***	-	-
β_7	-	-1,51(0,38)***	-	-
R^2	89,75 %	69,87 %	68,12 %	63,99 %
CMAP(mín.) (MO;CAL)	141,92 mg kg ⁻¹ (10; 0,0);	254,59 mg kg ⁻¹ (10; 1,07)	578,08 mg kg ⁻¹ (10; 0,18)	1022,57 mg kg ⁻¹ (10; 1,10)

***, **, *: significativo a 0,1, 1 e 5 %, respectivamente.

De acordo com os dados experimentais, para o solo RQo, os menores valores de CMAP foram observados nas doses 10 % de esterco bovino e 0 de calcário; para o solo LVAd-1, nas doses 10,0 % de esterco bovino e 1,07 vez a dose de calcário; para o solo LVAd-2, nas doses 10,0 % de esterco bovino e 0,18 de calcário e para o solo LVd, nas doses 10,0 % de esterco bovino e 1,10 de calcário (Tabelas 5 e 6). No solo LVAd-2, a calagem promoveu redução nos valores de CMAP somente quando combinadas com as doses inferiores a 5 % de MO. Nas doses de MO acima de 5 %, o aumento da calagem promoveu incremento na CMAP.

A matéria orgânica contribui para a redução da CMAP devido à competição dos ácidos orgânicos pelos sítios de adsorção de P e complexação do Al em solução (Hue, 1991). A matéria orgânica pode conter, também, sulfato e flúor (ligantes orgânicos), cálcio e magnésio liberados durante o processo de mineralização, que podem formar complexos com Al (sulfato e flúor) ou complexos solúveis com o P da solução do solo, evitando que o mesmo seja fixado (Iyamuremye et al., 1996). A calagem elevando o pH reduz a atividade do Al^{3+} e favorece a produção de hidroxilas (OH⁻), causando a precipitação de Fe e Al trocáveis, reduzindo a precipitação de fósforo. Porém, a calagem em excesso trouxe como consequência um incremento nos valores de CMAP nos solos mais argilosos, possivelmente devido à formação de compostos insolúveis de P ligado a Ca.

A capacidade máxima de adsorção de P (CMAP), obtida a partir das isotermas de Langmuir, obedeceram à seguinte ordem decrescente LVd>LVAd-2>LVAd-1>RQo. Nesta ordem, os solos apresentam teores decrescentes de matéria orgânica, Fe_d , Fe_o , gibbsita, argila e crescentes de K_i e K_r (Tabela 1). À medida que a mineralogia dos solos se torna mais oxidica, aumentam a adsorção de P e seu conteúdo nas formas ligadas a Al e Fe. A adsorção de P por óxidos é

apenas parcialmente reversível, ocorrendo o fenômeno de histerese, ou seja, a quantidade de P desorvida é inferior à quantidade adsorvida. No entanto, esse processo pode se tornar reversível em um período de tempo longo (Madrid & Posner, 1979). A goethita tem sido considerada como o principal componente da fração argila responsável pela adsorção de fósforo em solos do Brasil Central (Bahia Filho et al., 1983). A influência da substituição isomórfica de Fe por Al e da maior superfície específica da goethita sobre o fenômeno de adsorção de P também tem sido citada na literatura (Resende, 1976; Anand & Gilkes, 1987; Torrente et al., 1990; Ker, 1995; Ruan & Gilkes, 1996), bem como o efeito da morfologia dos cristais (Torrente et al., 1990; Schwertmann & Herbillon, 1992; Ruan & Gilkes, 1996). A gibbsita tem participação importante na adsorção de fósforo, embora de forma menos efetiva que a goethita. Porém, em razão da sua ocorrência em grandes quantidades em alguns Latossolos argilosos brasileiros, sua contribuição, em termos de adsorção total, pode ultrapassar aquela dos óxidos de ferro (Curi et al., 1988; Mesquita Filho & Torrent, 1992). Os solos que apresentaram maiores valores de CMAP corresponderam àqueles com menores valores de K_i (relação molecular SiO_2/Al_2O_3) e K_r (relação molecular $SiO_2/Al_2O_3+Fe_2O_3$) (Tabela 1), concordando com resultados obtidos por Curi et al. (1988).

Como comentado anteriormente para o P-rem, a aplicação de resíduo orgânico e/ou de calcário diminui a fixação de P e maximiza a adubação fosfatada, podendo reduzir os custos de produção das culturas.

3.3 Índice tampão de fósforo (ITP)

Para os solos RQo, LVAd-1 e LVAd-2, foi necessária a transformação dos dados de índice tampão de fósforo (ITP) para que os erros dos modelos ajustados atendessem às pressuposições de normalidade e homogeneidade de variâncias. As transformações foram:

$$ITPt(RQ) = \sqrt{\frac{1}{ITP} + 0,5} \text{ e } ITPt(LVAd\ 1\ e\ 2) = \text{Log}\left[\frac{1}{ITP}\right].$$

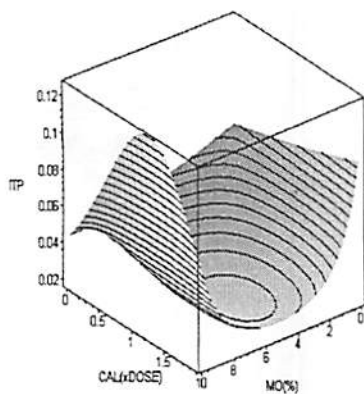
Por isso, para o estudo dos pontos de máximos aplicou-se o procedimento inverso, isto é, obtêm-se os pontos de mínimo do índice tampão de fósforo transformado (ITPt) por meio do modelo ajustado. Quando o valor encontrado para a variável resposta no ponto de mínimo for colocado na escala original (transformação inversa), obtêm-se o valor máximo.

Pelas Figuras 5 e 6 e nas Tabelas 7 e 8 verifica-se que, nos solos LVAd-1, LVAd-2 e LVd, o valor da variável ITP teve um comportamento crescente à medida que se adicionam esterco bovino e calcário. No solo RQo, ocorre um fato interessante, ou seja, com a adição de esterco bovino, há uma redução inicial nos valores de ITP, atingindo um valor mínimo por volta das doses 4,67 % de resíduo e 1,23 vez a dose de calcário. Após o que ocorre elevação dos valores de ITP, à medida que se adicionam mais resíduo orgânico e calcário. Tanto nas doses baixas quanto nas altas de matéria orgânica, a elevação das doses de calcário promoveu um aumento nos valores de ITP no solo RQo. Porém, nesse solo, a calagem, quando combinada com as doses intermediárias de esterco bovino, promoveu uma redução nos valores de ITP. No solo LVAd-1, ocorreu um comportamento semelhante, havendo uma leve redução dos valores de ITP com a adição da primeira dose de esterco bovino.

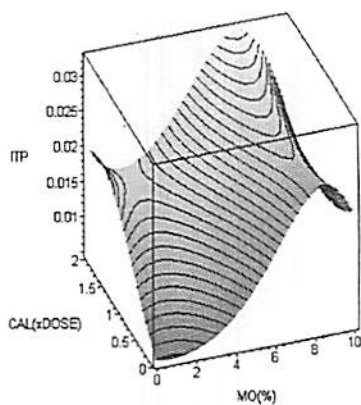
Como o ITP representa a resistência do solo às mudanças do P-lábil como consequência de alterações no P da solução, ou seja, quanto maiores os valores de ITP ($1/b$) menor é a resistência de liberação de P da fração lábil para a solução do solo (maior dessorção), o manejo do solo que beneficie a elevação do pH e incremento do teor de MO é essencial para a otimização do uso do fósforo (Fox & Kamprath, 1970; Holford & Mattingly, 1976; Laverdière & Karan, 1984).

Para os solos LVAd-1, LVAd-2 e LVd, o comportamento crescente dos valores de ITP com a elevação das doses de matéria orgânica e calcário significa uma maior liberação e aproveitamento do P nativo do solo e/ou fertilizantes adicionados ao mesmo. No solo RQo, que possui naturalmente uma baixa capacidade de retenção de P, houve uma redução no processo de dessorção do nutriente. A elevação da resistência de liberação de P da fração lábil (ITP) devido à aplicação de matéria orgânica e calagem pode significar uma menor perda do nutriente por lixiviação em solos de textura arenosa. Resultados semelhantes foram obtidos por Novak & Watts (2004), os quais observaram um efeito de aplicação de resíduos de estação de tratamento de esgoto sobre o aumento da capacidade de retenção de P por solos arenosos e redução das perdas do nutriente por lixiviação.

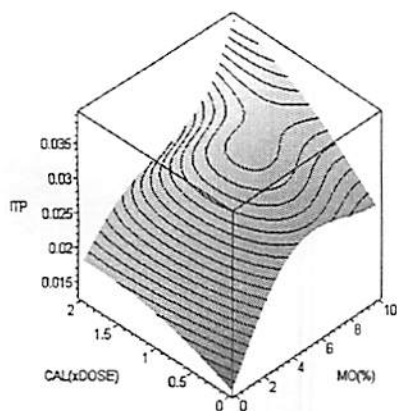
Solo RQo



Solo LVAd-1



Solo LVAd-2



Solo LVd

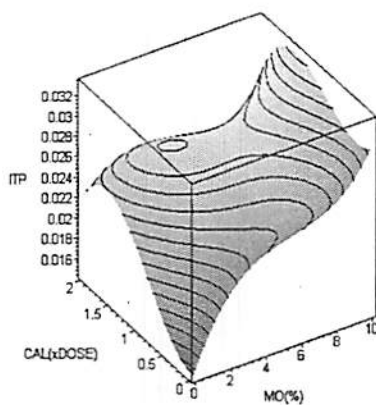


FIGURA 5. Representação gráfica do ITP, em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (CAL), na forma de superfície de resposta, para os solos RQo, LVAd-1, LVAd-2 e LVd.

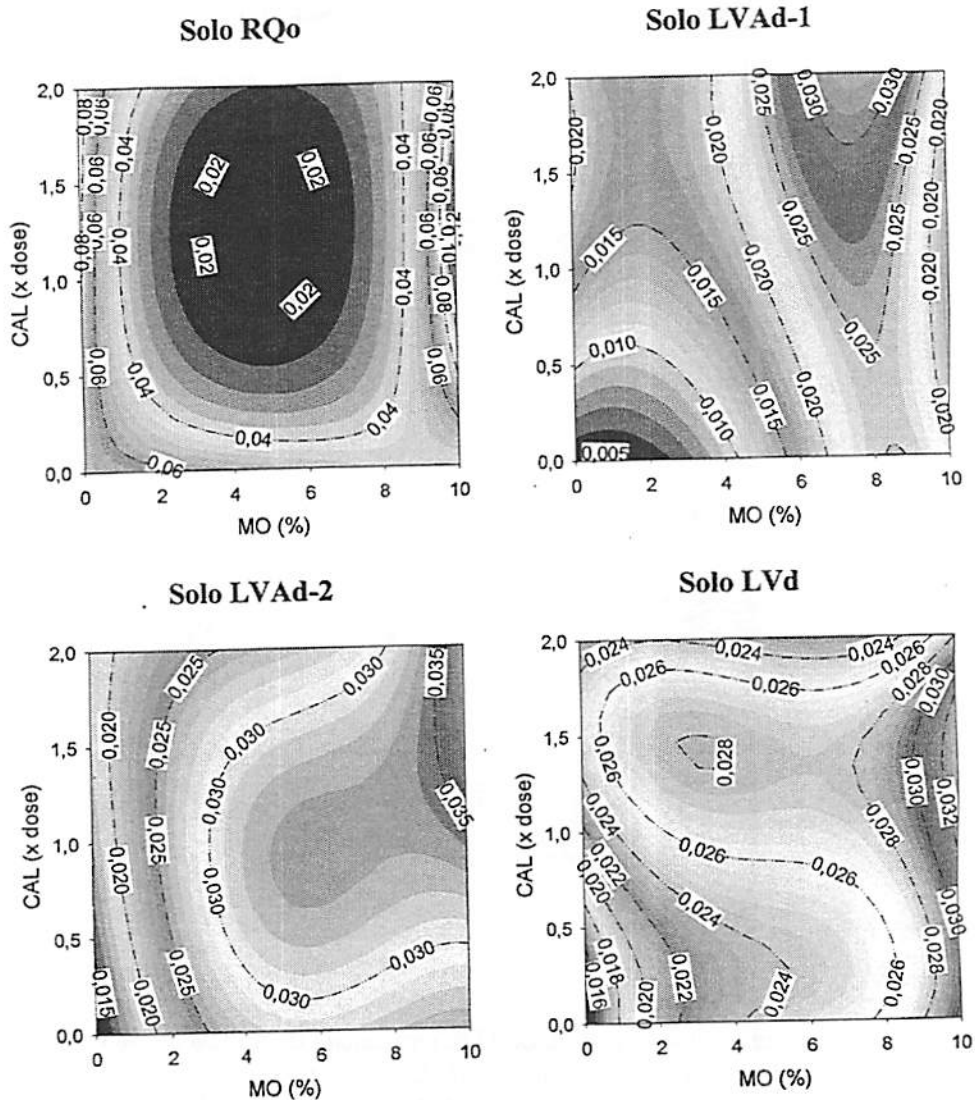


FIGURA 6. Cortes horizontais sobre o espaço fatorial da superfície de resposta mostrando isoquantas correspondentes a várias faixas de valores de ITP em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (CAL).

TABELA 7. Modelos ajustados para o ITP (y), em função da aplicação de esterco bovino (MO) e calcário (CAL), para os solos RQo, LVAd-1, LVAd-2 e LVd.

Solo	Modelo ajustado
RQo	$y = \beta_0 + \beta_1 MO + \beta_2 CAL + \beta_3 (MO)^2 + \beta_4 (CAL)^2 + \beta_5 MO * CAL + \beta_6 MO (CAL)^2$
LVAd-1	$y = \beta_0 + \beta_1 MO + \beta_2 CAL + \beta_3 (MO)^2 + \beta_4 (CAL)^2 + \beta_5 (MO)^3 + \beta_6 MO * CAL + \beta_7 MO (CAL)^2$
LVAd-2	$y = \beta_0 + \beta_1 MO + \beta_2 CAL + \beta_3 (MO)^2 + \beta_4 (CAL)^2 + \beta_5 (MO)^3 + \beta_6 MO (CAL)^2 + \beta_7 (MO)^2 (CAL)^2$
LVd	$y = \beta_0 + \beta_1 MO + \beta_2 CAL + \beta_3 (MO)^2 + \beta_4 (CAL)^2 + \beta_5 (MO)^3 + \beta_6 (CAL)^3 + \beta_7 MO * CAL + \beta_8 CAL (MO)^2$

TABELA 8. Estimativa dos parâmetros, significância e coeficientes de determinação (R^2) dos modelos ajustados apresentados na Tabela 7, e valores máximos para o ITP e quantidades ótimas de esterco bovino (MO) e calcário (CAL), em cada solo.

	Solo			
	RQo	LVAd-1	LVAd-2	LVd
β_0	3,86953(0,205)***	5,3207(0,1512)***	4,3367(0,0422)***	$1,446 \times 10^{-2} (9,9 \times 10^{-4})$ ***
β_1	0,09886(0,0348)**	0,1142(0,0969)ns	-0,3399(0,032)***	$4,619 \times 10^{-3} (7,1 \times 10^{-4})$ ***
β_2	-0,26059(0,212)n.s.	-1,7273(0,354)***	-0,3551(0,07)***	$-5,401 \times 10^{-4} (3,8 \times 10^{-3})$ ns
β_3	2,41342(0,183)***	-0,0939(0,024)***	0,0471(0,0079)***	$-7,456 \times 10^{-4} (1,6 \times 10^{-4})$ ***
β_4	-0,27077(0,025)***	0,5156(0,1642)**	0,0962(0,033)**	$1,33 \times 10^{-2} (5,6 \times 10^{-3})$ *
β_5	-0,92358(0,110)***	0,0068(0,1642)***	-0,002(0,0005)***	$4,433 \times 10^{-5} (1,0 \times 10^{-5})$ ***
β_6	0,10548(0,0154)***	0,2175(0,1642)***	0,042(0,007)***	$-5,533 \times 10^{-3} (1,9 \times 10^{-3})$ **
β_7		-0,0738(0,0268)**	-0,0044(0,001)***	$-1,43 \times 10^{-3} (3,7 \times 10^{-4})$ ***
β_8				$9,127 \times 10^{-5} (3,6 \times 10^{-5})$ ***
R^2	79,66 %	62,83 %	87,19 %	76,07 %
ITP (máx.)	0,126	0,0327	0,0391	0,0333
(MO;CAL)	(10,00; 1,22)	(7,49; 2,00)	(10,00; 2,00)	(10,00; 1,34)

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

CURI, N.; CAMARGO, O. A.; GUEDES, A.; SILVEIRA, J. V. Sorção de fósforo em materiais de latossolos do Brasil sudeste. In: REUNIÃO DE CLASSIFICAÇÃO, CORRELAÇÃO DE SOLOS E INTERPRETAÇÃO DA APTIDÃO AGRÍCOLA, 3., 1988, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: EMBRAPA-SNLCS/SBCS, 1988. p. 267-282.

DAY, P. R. Particle fractionation and particle-size analysis. In: BLACK, C. A. (Ed.) **Methods of soil analysis**. Madison: ASA, 1965. v. 1, p. 545-566.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa Produção de informação; Rio de Janeiro: Embrapa solos, 1999. 412 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solo. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura, 1997. 212 p.

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

FONSECA, D. M. **Níveis críticos de fósforo em amostras de solos para o estabelecimento de *Andropogon gayanus*, *Brachiaria decumbens* e *Hyparrhenia rufa***. 1987. 146 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

FOX, R. L.; KAMPRATH, E. J. Adsorption and leaching of P in acid organic soils and high organic matter sand. **Soil Science Society America proceedings**, Madison, v. 35, n. 1, p. 154-156, Jan./Feb. 1971.

GOH, T. B.; HUANG, P. M. Changes in thermal stability and acidic characteristics of hydroxyl-Al-montmorillonite complexes formed in the presence of citric acid. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 65, n. 3, p. 519-522, Aug, 1985.

GUILHERME, L. R. G.; CURI, N.; SILVA, M. L. N.; BRENÓ, N. B.; MACHADO, R. A. F. Adsorção de fósforo em solos de várzea do estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 1, p. 27-34, jan./mar. 2000.

HOLFORD, I. C. R.; MATTINGLY, G. E. G. Phosphate adsorption and availability plant of phosphate. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 44, n. 2, p. 377-389. 1976.

HUE, N. V. Effects of organic acids/anions on P sorption and phytoavailability in soils with different mineralogies. **Soil Science**, Baltimore, v. 152, n. 6, p. 463-471, 1991.

IYAMUREMYE, F.; DICK, R. P.; BAHAM, J. Organic amendments and phosphorus dynamics: Phosphorus chemistry and sorption. **Soil Science**, Baltimore, v. 161, p. 426-435, 1996.

KER, J. C. **Mineralogia, sorção e dessorção de fosfato, magnetização e elementos traços de Laboratório do Brasil**. 1995. 181p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

KHURI, A. I.; CORNELL, J. A. **Response Surfaces-Designs and Analyses**. 2. ed. New York, 1996. 510 p.

KLUG, H. P.; ALEXANDER, L. E. **X-ray diffraction procedures for polycrystalline and amorphous materials**. New York: John Wiley, 1974. 716 p.

KRISHNA MURTI, G. S. R.; VOLK, V. V.; JACKSON, M. L. Calorimetric determination of iron of mixed valency by orthophenantroline. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 30, p. 663-664, 1966.

LAVERDIÈRE, M. R.; KARAM, A. Sorptions of phosphorus by some surface soils from Quebec in relation to their properties. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 15, p. 1215-1230, 1984.

LOPES, A. S.; COX, F. R. Relação de características físicas, químicas e mineralógicas com fixação de fósforo em solos sob cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 3, p. 82-88, 1979.

MADRID, L.; POSNER, A. M. Desorption of phosphate from goethite. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 30, p. 697-707, 1979.

McBRIDE, M. B. **Environmental Chemistry of Soils**. New York: University Press, 1994. 406 p.

MEHRA, O. P.; JACKSON, N. L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. **Clays and Clays Minerals**, Lawrence, v. 3, p. 317-327, 1960.

MESQUITA FILHO, M. V.; TORRENT, J. Phosphate sorption as related to mineralogy of a hydrosequence of soils from the Cerrado region (Brazil). **Geoderma**, Amsterdam, v. 58, p. 107-123, 1992.

MUNIZ, A. S. **Disponibilidade de fósforo avaliada por extratores químicos e pelo crescimento da soja (*Glycine max* L.) em amostras de solos de diferentes valores do fator capacidade.** 1983. 79 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

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

NOVAK, J. M.; WATTS, D. W. Increasing the phosphorus sorption capacity of southeastern coastal plain soils using water treatment residuals. **Soil Science**, Baltimore, v. 169, n. 3, p. 206-214, mar. 2004.

OLSEN, S. R.; WATANABE, F. S. A method to determine a phosphorus adsorption maximum of soils as measured by the Langmuir Isotherm. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 21, p. 144-149, 1957.

RAIJ, B. van.; QUAGGIO, J. A.; CANTARELLA, H. FERREIRA, M. E.; LOPES, A. S.; BATAGLIA, O. C. **Análise química do solo para fins de fertilidade.** Campinas: Fundação Cargil, 1987. 170 p.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: language and environment for statistical computing.** R Foundation for Statistical computing, Vienna, Austria. 2004. Disponível em: <<http://www.R-project.org>>. acesso em: 25 dez 2004.

RESENDE, J. M. A. **Comparação de índices de sorção de fósforo no solo.** 1983. 79 p. (Tese de Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

RESENDE, M. **Mineralogy, chemistry, morphology and geomorphology of some soils of the Central Plateau of Brazil.** 1976. 327 p. Thesis (Ph. D.) - Purdue University, West Lafayette.

RUAN, H. D.; GILKES, R. J. Kinetics of phosphate sorption and desorption by synthetic aluminous goethite before and after thermal transformation to hematite. **Clay Minerals**, London, v. 31, n. 1, p. 63-74, Mar. 1996.

SCHWERTMANN, U. Differenzierung der Eisenoxide des Bodens durch Extraktion mit Ammonium-Oxalat-Lösung. **Zeitschrift fuer Pflanzernahrung**, Berlin, v. 105, n. 4, p. 194-202, 1964.

SCHWERTMANN, U.; HERBILLON, A. J. Some aspects of fertility associated with the mineralogy on highly weathered tropical soils. In: **Myths as science of soils of the tropics. SSSA Special Publication**, Madison, n. 29, p. 47-59, 1992.

TORRENT, J.; BARRON, V.; SCHWERTMANN, U. Phosphate adsorption and desorption by goethites differing in crystal morphology. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 54, p. 1007-1012, 1990.

CAPÍTULO III

FORMAS DE FÓSFORO EM SOLOS SOB INFLUÊNCIA DA CALAGEM E ADUBAÇÃO ORGÂNICA



RESUMO

SOUZA, Renato Ferreira de. Formas de fósforo em solos sob influência da calagem e adubação orgânica. In: ____ **Dinâmica de fósforo em solos sob influência da calagem e adubação orgânica, cultivados com feijoeiro**. 2005. p.65-100. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.¹

No solo, o P ocorre nas formas orgânicas (Po) e inorgânicas (Pi), com diferentes graus de estabilidade ou solubilidade e, portanto, com diferentes graus de disponibilidade à absorção vegetal. A natureza e a dinâmica do P apresentam comportamentos distintos sob diferentes sistemas de uso do solo, ou seja, práticas como calagem e o aumento do teor de matéria orgânica influenciam as transformações e distribuição das formas de fósforo no solo. Visando a avaliar a influência da calagem e adubação orgânica sobre as formas de fósforo no solo, foram conduzidos, em casa-de-vegetação do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras, quatro experimentos em amostras dos solos Neossolo Quartzarênico órtico (RQo), Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico textura média (LVAd-1), Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico textura argilosa (LVAd-2) e Latossolo Vermelho distrófico (LVd). Foi utilizado o delineamento experimental inteiramente ao acaso, no esquema fatorial 4x5, com quatro repetições. Os tratamentos foram constituídos por cinco doses de esterco bovino (0,0; 2,5; 5,0; 7,5 e 10% do volume total de solo) e 4 níveis de calagem (0,0; 0,5; 1 e 2 vezes a dose recomendada para atingir V=60%). Foram avaliados o teor de P Mehlich-1 e a distribuição das formas lábeis, pouco lábeis e não lábeis de fósforo no solo. O incremento nas doses de esterco bovino e calcário promoveu um aumento significativo nos teores de P Mehlich-1 nos solos, porém, esse aumento foi diferenciado, sendo proporcionalmente maior nos solos menos oxidados. De maneira geral, a adição de esterco bovino contribuiu para a elevação de todas as formas de P no solo. A contribuição das formas de P pouco lábeis para a fração disponível às plantas foi bastante substancial, porém, predominaram nesses solos as formas não lábeis de P.

¹ Comitê Orientador: Prof. Valdemar Faquin - UFLA (Orientador); Prof. Luiz Arnaldo Fernandes – NCA/UFMG.

ABSTRACT

SOUZA, Renato Ferreira de. Forms of phosphorus in soils under the influence of liming and organic manuring. In: ____ **Phosphorus dynamics in soils under the influence of liming and organic manuring, cultivated with bean plant.** 2005. p.65-100. Thesis (Doctor Science in Soil Science and Plant Nutrition) – Federal University of Lavras, Lavras, MG.¹

In the soil P occurs in organic (Po) and inorganic (Pi) forms with different degrees of stability or solubility and, therefore, different degrees of readiness for plant absorption. The nature and the dynamics of P present different behaviors under different soil use systems, in other words, practices such as liming and the increase in levels of organic matter influence the transformation and distribution of the forms of phosphorus in the soil. Seeking to evaluate the influence of the liming and organic manuring on the phosphorus, four experiments were conducted in the greenhouse of the Soil Science Department of the Federal University of Lavras, with soil samples of ortic Quartzarenic Neosol sand texture, dystrophic Red-Yellow Latosol sandy clay loam texture, dystrophic Red-Yellow Latosol sandy clay texture and dystrophic Red Latosol clay texture. The experimental layout used was entirely randomized, in the 4x5 factorial outline, with four repetitions. The treatments were made up of five doses of bovine manure (0,0; 2,5; 5,0; 7,5 and 10 % of the total volume of soil) and 4 liming levels (0,0; 0,5; 1 and 2 times the dose recommended to reach V=60%). The level of P Mehlich-1 and the distribution of the unstable, little unstable and non-unstable forms of phosphorus in the soil were appraised. The increment in the doses of bovine manure and lime promoted a significant increase in P Mehlich-1 levels in the soil, however, that increase was differentiated, being proportionately larger in the less oxidic soils. In a general way the addition of bovine manure contributed to the elevation of all forms of P in the soil. The contribution of little unstable (less labile P forms) forms P for the available fraction of plants was quite substantial, however, in these soils the non-unstable form of P (non labile P forms) prevailed.

¹ Guidance Committee: Prof. Valdemar Faquin - UFLA (Adviser), Prof. Luiz Arnaldo Fernandes – NCA/UFMG.

1 INTRODUÇÃO

O fósforo encontra-se nos solos nas formas orgânicas (Po) e inorgânicas (Pi), que se diferenciam entre si pelo grau de estabilidade ou solubilidade e, portanto, com diferentes disponibilidades à absorção vegetal. O P inorgânico pode se encontrar em solução (P-solução); precipitado com Al, Fe e Ca ou adsorvido aos óxidos de Fe e Al da fração argila, ambos em equilíbrio com a solução e compõem a fração lábil de P no solo (P-lábil). A fração não lábil é composta pelo P sob a forma de compostos de baixa solubilidade (P mineralogicamente estável) ou adsorvido às partículas do solo, não estando essas formas em equilíbrio imediato com o P em solução (Larsen, 1967).

Em ecossistemas naturais, os processos geoquímicos são responsáveis pela dinâmica do P em longo prazo. Porém, devido à maior parte do fósforo disponível às plantas ter como fonte a matéria orgânica, os processos biológicos influenciam bastante a distribuição das formas de P no solo (Smeck, 1985; Walbridge, 1991). Processos biológicos regulam a dinâmica e distribuição de formas lábeis de P, e a reciclagem da forma orgânica é um importante fator na disponibilização desse nutriente às plantas (Acquaye, 1963; Adeptu & Corey, 1976; Harrison, 1982; Stewart & Tiessen, 1987).

O manejo do solo, as remoções de P pelas culturas, as aplicações de fertilizantes fosfatados, a calagem e adição de matéria orgânica alteram bastante a dinâmica das transformações do P no solo (Tiessem et al., 1992). Em estudos conduzidos em cafeeiros cultivados em Latossolo Roxo distrófico, foi observado que as principais transformações de P foram devidas às alterações nos valores de pH e nos teores de matéria orgânica desse solo (Pavan & Chaves, 1996). Estudos têm demonstrado que a natureza e a dinâmica da matéria orgânica e a ciclagem de P apresentam comportamentos diferentes sob diferentes sistemas de manejo do solo. Portanto, práticas de cultivo que alteram o comportamento da matéria

orgânica exercem grande impacto sobre a distribuição das formas de fósforo no solo (Turrión, 2000). Vários trabalhos visando entender a dinâmica do P têm demonstrado a influência de diferentes práticas como a calagem, a adição de fontes ou doses de matéria orgânica e os sistemas de cultivo sobre as transformações das formas de P no solo (Thompson & Black, 1970; Hedley et al., 1982; O'Halloran et al., 1987; Pavan & Leal, 1995; Pavan & Filho, 1995; Iyamuremye et al., 1996; Beck & Sanchez, 1996; Nziguheba et al., 1998; Tokura et al., 2002).

Devido ao comportamento do fósforo e para um melhor entendimento de sua dinâmica no solo, têm sido realizados diversos trabalhos de fracionamento seqüencial pelo uso de soluções químicas com diferentes capacidades de extração de P (Silva & Rajj, 1999). As metodologias de fracionamento seqüencial, propostas por Chang & Jackson (1957) e Hedley et al. (1982), têm sido amplamente utilizadas para estudar as transformações do P no solo em função de diferentes práticas de manejo, com o objetivo de incrementar os conhecimentos sobre sua dinâmica e predição de sua biodisponibilidade e riscos de perdas.

Objetivou-se com este estudo avaliar o efeito da calagem e adição de esterco bovino sobre as formas de fósforo em quatro solos, com diferentes texturas, mineralogia e teores de matéria orgânica.

2 MATERIAL E MÉTODOS

A descrição e as caracterizações químicas, físicas e mineralógicas dos solos, bem como o delineamento experimental e os tratamentos utilizados, estão descritos no item Material e Métodos do Capítulo 2.

Após o período de 30 dias de incubação do solo com esterco bovino e calagem, cada unidade experimental recebeu as doses de 400, 320, 250 e 200 mg dm^{-3} de P na forma de $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, seguindo a sugestão de Alvarez & Fonseca (1990), para os solos Latossolo Vermelho distrófico (LVd), Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd-1), Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd-2) e Neossolo Quartzarênico órtico (RQo), respectivamente. Os solos receberam, ainda, a aplicação de uma adubação básica com macro e micronutrientes que forneceu: 70 mg de N; 100 mg de K; 40 mg de S; 0,5 mg de B; 1,5 mg de Cu e 5,0 mg de Zn dm^{-3} de solo, na forma de reagentes p.a.. Os nutrientes foram aplicados em forma de solução e misturadas ao solo para melhor uniformização. As fontes utilizadas foram: KH_2PO_4 ; $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$; $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$; $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$; $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$; e H_3BO_3 . As amostras dos solos foram novamente incubadas, com umidade próxima à capacidade de campo, por um período de 30 dias. Após esse período de incubação, foram coletadas subamostras dos solos em cada parcela experimental para as determinações analíticas. O P Mehlich-1 foi extraído pelo HCl 0,05 mol L^{-1} + H_2SO_4 0,0125 mol L^{-1} , conforme EMBRAPA (1997) e o fracionamento seqüencial das formas de P nos solos foi realizado de acordo com o método modificado de Hedley et al. (1982) (Figura 1).

PROCEDIMENTO	FORMAS DE P
1,5 g de solo + água + resina. Agitar 16 h. Resina + HCl 0,5 mol L ⁻¹ . Agitar.	P-resina
Após centrifugar e descartar o sobrenadante; Adicionar NaHCO ₃ 0,5 mol L ⁻¹ , agitar 16 h e centrifugar; Numa alíquota: acidificar com H ₂ SO ₄ e esfriar; Noutra: autoclavagem com persulfato de amônio + H ₂ SO ₄ ; Pt-NaHCO ₃ – Pi-NaHCO ₃	Pi-NaHCO ₃ Pt-NaHCO ₃ Po-NaHCO ₃
Após centrifugar e descartar o sobrenadante; Adicionar NaOH 0,1 mol L ⁻¹ , agitar 16 h e centrifugar; Numa alíquota: acidificar com H ₂ SO ₄ e esfriar; Noutra: autoclavagem com persulfato de amônio + H ₂ SO ₄ ; Pt-NaOH – Pi-NaOH	Pi-NaOH Pt-NaOH Po-NaOH
Após centrifugar e descartar o sobrenadante; Adicionar NaOH 0,5 mol L ⁻¹ , agitar 16 h e centrifugar; Numa alíquota: acidificar com H ₂ SO ₄ e esfriar; Noutra: autoclavagem com persulfato de amônio + H ₂ SO ₄ ; Pt-NaOH – Pi-NaOH	Pi-NaOH Pt-NaOH Po-NaOH
Após centrifugar e descartar o sobrenadante; Adicionar HCl 1 mol L ⁻¹ , agitar 16 h e centrifugar;	P-HCl
0,5 g resíduo do solo seco; Digestão a 360° C com H ₂ SO ₄ e H ₂ O ₂ .	P-residual

FIGURA 1. Procedimento simplificado de fracionamento seqüencial de fósforo (modificado de Hedley et al., 1982)

Por esse procedimento de fracionamento seqüencial, as formas de fósforo lábeis foram extraídas pela resina de troca aniônica (P-resina) saturada com bicarbonato; o P inorgânico (Pi-bic) e orgânico (Po-bic) adsorvidos nas superfícies dos colóides foram extraídos com NaHCO_3 ($0,5 \text{ mol L}^{-1}$, a pH 8,5). As formas de fósforo pouco lábil, correspondentes às formas inorgânicas ligadas a Fe e Al (Pi-NaOH) e orgânicas associadas com compostos húmicos (Po-NaOH), foram extraídas com NaOH ($0,1$ e $0,5 \text{ mol L}^{-1}$). As formas de P relativamente insolúveis (fósforo não lábil), associadas com cálcio, foram extraídas com HCl ($1,0 \text{ mol L}^{-1}$) (Pi-HCl) e o P residual, contendo as formas mais estáveis de Po e insolúveis de Pi, foi extraído por digestão com H_2SO_4 concentrado e H_2O_2 (P-residual). Em todos os extratos de solo, o fósforo foi determinado por colorimetria, segundo Murphy & Riley (1962).

Para a variável P Mehlich-1, foram ajustados modelos de regressão múltipla (superfícies de resposta) em função das doses de calcário e de resíduo aplicadas (Khuri & Cornell, 1996 e Alvarez V., 1994). A adoção do sistema linear formado pelas derivadas parciais das equações da superfície de resposta igualada a zero fornece os valores críticos, que corresponde aos valores máximos, mínimos ou nenhum deles, de acordo com o comportamento específico da variável em estudo. Sobre o espaço fatorial na superfície de resposta foram feitos cortes horizontais, obtendo-se isoquantas correspondentes a vários níveis de valores da variável resposta em função das variáveis explicativas. Foi utilizado o programa de análises estatísticas R (R Development Core Team, 2004)

As formas de fósforo lábeis, pouco lábeis e não lábeis foram submetidas à análise de variância e ao estudo de regressão simples, ajustando-se modelos em função dos tratamentos aplicados utilizando-se o programa de análises estatísticas SISVAR (Ferreira, 2000).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Fósforo extraível pelo extrator Mehlich-1

Os modelos ajustados, para a variável P-Mehlich-1, foram selecionados conforme o procedimento stepwise, isto é, com base em um modelo geral (completo), selecionou-se um modelo menor (submodelo), o qual forneceu uma boa explicação da variável resposta em função das variáveis explicativas. O procedimento stepwise permitiu a seleção de modelos em que todos os parâmetros foram significativos (Tabelas 1 e 2). Para os casos em que a variável (de efeito "principal") é de interesse, o parâmetro associado a ela é considerado no modelo, mesmo não sendo significativo. Esse fato ocorreu no modelo para a variável P Mehlich-1, no solo RQo.

Para os solos RQo, LVAd-1 e LVAd-2, as respostas à aplicação de matéria orgânica e calagem foram positivas até as doses em torno de 6 e 8 % de matéria orgânica e doses em torno de 1,4 vez a dose de calcário, após as quais observou-se uma tendência de redução nos teores de P Mehlich-1. Para o solo LVd, a aplicação de matéria orgânica não influenciou de maneira nítida os valores de P Mehlich-1, ocorrendo um pequeno incremento até a dose de 2,0 % de resíduo orgânico. A elevação dos níveis de calagem proporcionou incrementos nos teores de P até o nível 0,22 vez a dose de calcário, a partir da qual ocorreram respostas negativas. Esses resultados podem ser confirmados por meio das Figuras 2 e 3 e das Tabelas 1 e 2.

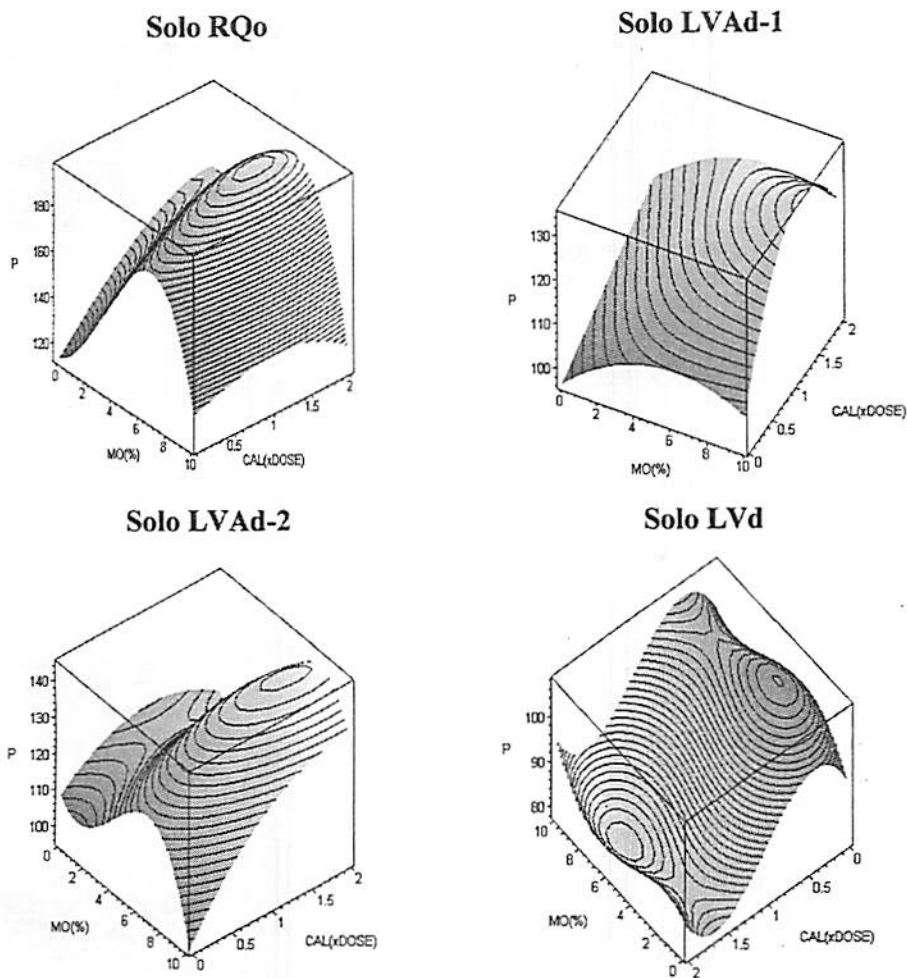


FIGURA 2. Representação gráfica do P Mehlich-1 (mg dm^{-3}), em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (CAL), na forma de superfície de resposta, para os solos RQo, LVAd-1, LVAd-2 e LVd.

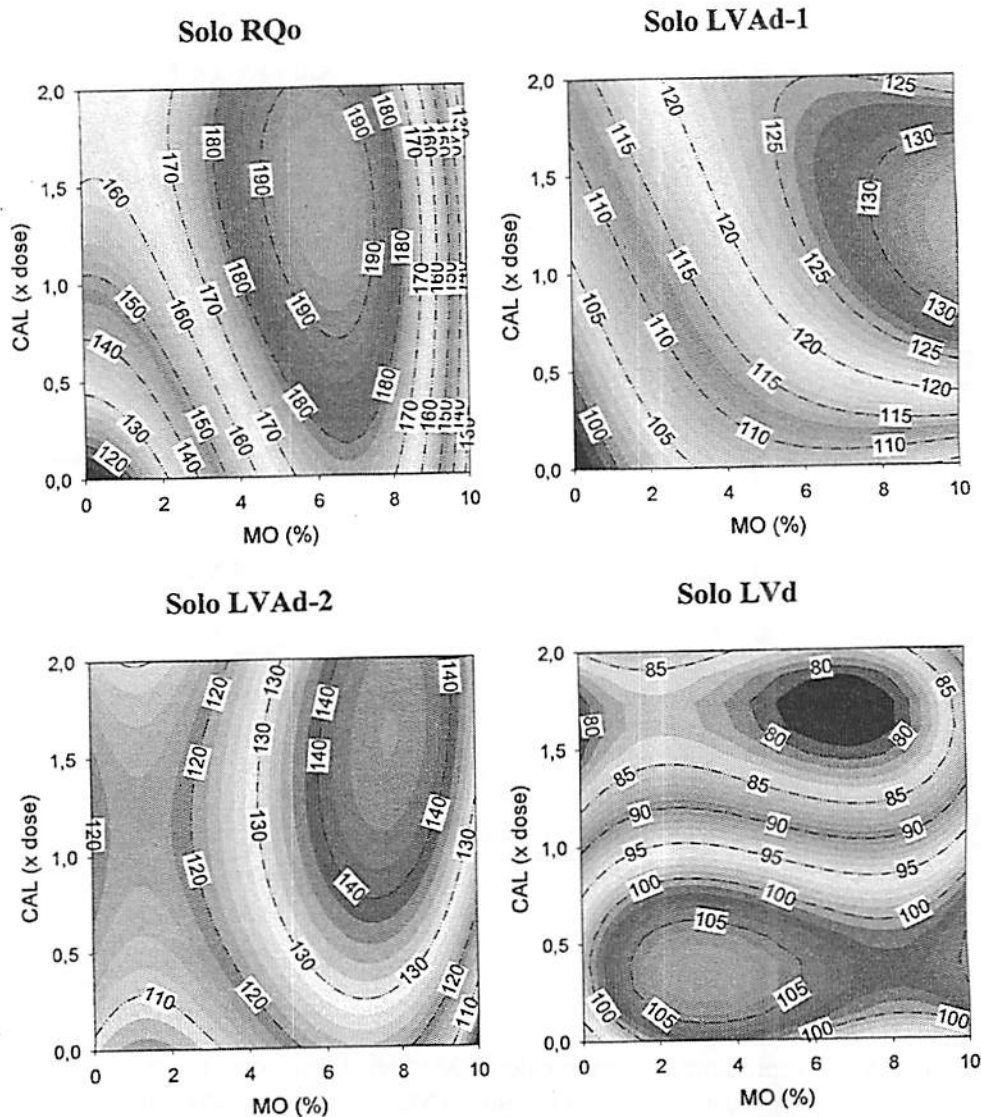


FIGURA 3. Corte horizontal sobre o espaço fatorial nas superfícies de resposta mostrando isoquantas correspondentes a diferentes faixas de valores para o P Mehlich-1 (mg dm^{-3}) em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (CAL).

TABELA 1. Modelos ajustados para o P Mehlich-1 (y) em função da aplicação de esterco bovino (MO) e calcário (CAL), para os solos RQo, LVAd-1, LVAd-2, LVd.

Solo	Modelo ajustado
RQo	$y = \beta_0 + \beta_1 MO + \beta_2 CAL + \beta_3 (MO)^2 + \beta_4 (MO)^3 + \beta_5 (CAL)^3 + \beta_6 MO * CAL$
LVAd-1	$y = \beta_0 + \beta_1 MO + \beta_2 CAL + \beta_3 (MO)^2 + \beta_4 (CAL)^2 + \beta_5 (MO)^2 CAL + \beta_6 (MO)^2 (CAL)^2$
LVAd-2	$y = \beta_0 + \beta_1 MO + \beta_2 CAL + \beta_3 (MO)^2 + \beta_4 (CAL)^2 + \beta_5 (MO)^2 CAL + \beta_6 (MO)^3$
LV	$y = \beta_0 + \beta_1 MO + \beta_2 CAL + \beta_3 MO^2 + \beta_4 CAL^2 + \beta_5 MO^3 + \beta_6 CAL^3 + \beta_7 MO^2 * CAL$

TABELA 2. Estimativa dos parâmetros, significância e coeficientes de determinação (R²) dos modelos ajustados apresentados na Tabela 1, e valores máximos para o P Mehlich-1 e quantidades ótimas de esterco bovino (MO) e calcário (CAL), em cada solo.

Parâmetro	SOLO			
	RQo	LVAd-1	LVAd-2	LVd
β_0	113,16(4,38)***	98,15(0,91)***	108,51(3,81)***	96,26(0,99)***
β_1	2,04(3,12) ns	-2,27(1,191)*	-6,02(2,51)*	8,13(1,19)***
β_2	38,95(5,48)***	1,44(0,37)***	2,71(0,56)***	-1,89(0,30)***
β_3	3,52(0,78)***	-0,13(0,03)***	-0,22(0,04)***	0,11(0,02)***
β_4	-0,36(0,05)***	4,53(2,12)*	20,94(4,99)***	10,91(5,00)*
β_5	-3,53(1,07)**	1,59(0,91)*	-9,37(2,27)***	-29,04(8,08)***
β_6	-2,72(0,52)***	0,47(0,06)***	0,15(0,04)***	9,11(2,85)**
β_7		-0,22(0,03)***		0,09(0,02)***
R ²	81,44 %	98,21 %	72,35 %	66,66 %
Pt. Máx (MO,CAL)	196,58 (6,28;1,44)	134,78 (8,37;1,38)	146,11 (7,62; 1,59)	107,44 (2,90; 0,22)

***, **, * e ns: significativo a 0,1; 1 e 5 % e não significativo, respectivamente.

Na Figura 3, podem ser observados cortes horizontais sobre o espaço fatorial nas superfícies de resposta mostrando isoquantas correspondentes a diferentes faixas de valores para a variável P-Mehlich-1 (mg dm^{-3}), em função da aplicação de esterco bovino (MO) e calcário (CAL). Nessa figura verificam-se curvas em que todas as combinações de esterco bovino e calagem promovem o mesmo valor de P Mehlich-1.

A elevação dos valores de P Mehlich-1, com o aumento das doses de resíduo, pode ser atribuída ao bloqueio dos sítios de adsorção de fósforo no solo, onde os grupos funcionais carboxílicos e fenólicos da matéria orgânica se ligam às hidroxilas dos óxidos de Fe e Al (Hue, 1991). A calagem, além de neutralizar o Fe e Al trocáveis, eleva o pH do solo, fazendo com que haja um balanço de cargas negativas no solo, reduzindo, assim, a adsorção de P (McBride, 1994). Porém, tanto nas doses altas de esterco bovino quanto nos níveis altos de calagem houve uma tendência de redução nos valores de P-Mehlich-1. Isso ocorreu, possivelmente, devido à adsorção de P aos compostos húmicos, dado o caráter aniônico da matéria orgânica que, por via de pontes de cátions (Al, Fe e Ca) a ela adsorvidos, retém o P (Novais & Smyth, 1999). Com uma calagem excessiva e presença de muito Ca trocável, pode haver precipitação de P, formando um produto insolúvel na forma de P-Ca (Novais & Smyth, 1999).

Apesar de as doses de P aplicadas serem bem superiores nos solos mais argilosos (400, 320, 250 e 200 mg dm^{-3} para os solos LVd, LVAd-2, LVAd-1 e RQo, respectivamente), os seus teores nos solos pelo extrator Mehlich-1 tiveram um comportamento inverso, isto é, os solos mais arenosos apresentaram valores maiores. Isso pode ser explicado pela maior capacidade de adsorção de P dos solos mais argilosos, que apresentaram a seguinte ordem decrescente: LVd > LVAd-2 > LVAd-1 > RQo, conforme discutido no Capítulo 2. Os solos com mineralogia mais oxidada apresentam maior adsorção de P e, conseqüentemente,

menores teores de P Mehlich-1. A goethita tem sido considerada como o principal componente da fração argila responsável pela adsorção e redução de fósforo disponível em solos do Brasil Central (Bahia Filho et al., 1983). A gibbsita tem participação importante na adsorção de fósforo, embora de forma menos efetiva que a goethita. Porém, em razão de sua presença em grandes quantidades no LVd e LVAd-2 (Tabela 1, Capítulo 2), sua contribuição para a adsorção total é apreciável, podendo superar àquela dos óxidos de ferro (Curi et al., 1988; Mesquita Filho & Torrent, 1992). Além da mineralogia, os teores de argila apresentada pelos solos foram bastante distintos (Tabela 1, Capítulo 2) e a maior superfície específica, normalmente apresentada pelos solos mais argilosos, contribui para a maior fixação e menor disponibilidade de P.

3.2 Formas de fósforo

A calagem e adubação orgânica, bem como a interação entre os dois fatores, influenciaram significativamente as formas de fósforo em todos os solos estudados.

Na Figura 4, verifica-se o comportamento das formas de P em função da aplicação de esterco bovino e calcário no solo RQo, onde se pode observar que, de modo geral, para todas as formas houve um aumento das frações de P com a elevação das doses de esterco. Para as formas lábeis - prontamente disponíveis (P-resina + Pi-NaHCO_3 e Po-NaHCO_3) e as formas pouco lábeis - formas com disponibilidade restrita (Pi-NaOH e Po-NaOH), ocorreu um ajuste quadrático (Tabela 3), mostrando aumento com a elevação das doses de esterco, apresentando, entretanto, uma tendência de redução nas doses maiores, dependendo do nível de calcário. Exceção foi observada para as formas P-resina + Pi-NaHCO_3 e Pi-NaOH nas doses de calcário 0,0 e 1,0, que apresentaram um comportamento linear crescente (Tabela 3). As formas não lábeis de P (P-HCl +

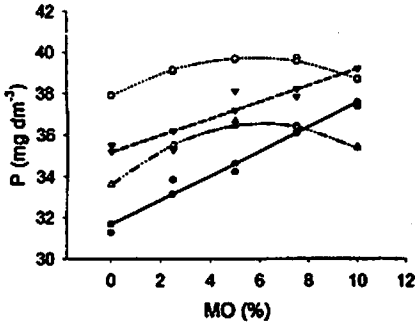
P-residual) apresentaram, também, um incremento significativo com o aumento nas doses de matéria orgânica. No solo RQo, independentemente das doses de matéria orgânica ou calagem, as formas não lábeis de P contribuíram com a maior parte do P total no solo.

As formas pouco lábeis de P (P_i e P_o -NaOH) foram as que, proporcionalmente, apresentaram maiores incrementos com as doses de esterco bovino. Convém salientar que, em estudo de Araújo et al. (1993), conduzido na zona canavieira do Nordeste, constatou-se que essa forma tem grande contribuição para o crescimento vegetal, indicando um caráter lábil dessa forma de P. O aumento observado na fração de P_o -NaOH indicam um efeito de grande importância da aplicação de resíduo orgânico, pois, esse reservatório representa um compartimento importante na ciclagem de P no solo (Stewart & Tiessen, 1987; Tate & Salcedo, 1988). Pelo processo de mineralização/imobilização, o P orgânico pode se comportar como fator quantidade, tamponando as formas mais lábeis de P, mediante o controle da mineralização (Tiessen et al., 1984).

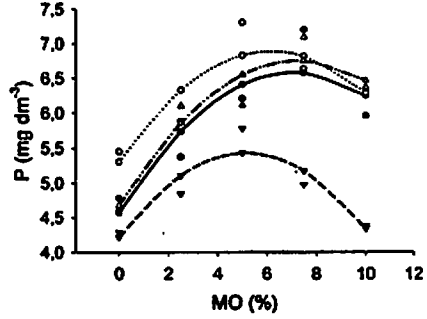
À exceção do P-resina + P_i -NaHCO₃, em que o aumento das doses de calcário promoveu incremento nos teores, as demais formas de P nesse solo não sofreram uma influência definida pela calagem (Figura 4).

Formas lábeis de P

P-resina + Pi-NaHCO₃

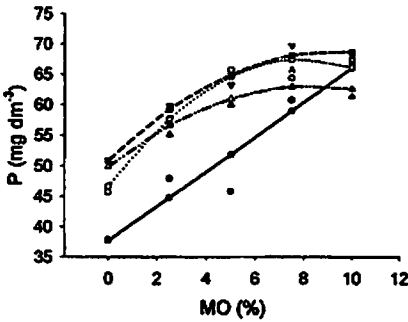


Po-NaHCO₃

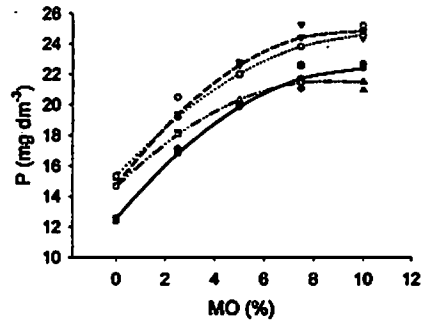


Formas pouco lábeis de P

Pi-NaOH (0,1 + 0,5 mol L⁻¹)



Po-NaOH (0,1 + 0,5 mol L⁻¹)



Formas não lábeis de P

P-HCl + P-residual

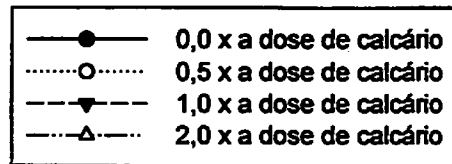
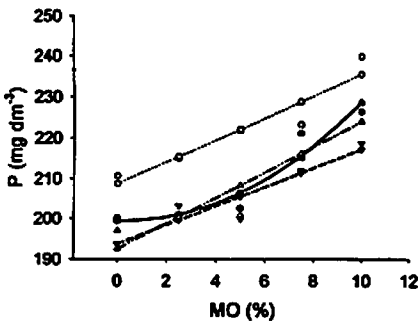


FIGURA 4. Teores de P (mg dm⁻³) em amostras de solo RQo, em função da aplicação de esterco bovino, em cada nível de calcário, para as diferentes formas de fósforo.

TABELA 3. Equações de regressão ajustadas para as formas lábeis (P-resina+Pi-NaHCO₃ e Po- NaHCO₃); pouco lábeis (Pi e Po-NaOH 0,1+0,5 mol L⁻¹) e não lábeis de P (P-HCl+P-residual) (Y=mg dm⁻³) em função das doses de esterco bovino aplicadas (x=%) em cada nível de calcário (CAL) utilizado, no solo RQo.

FORMAS DE P	CAL	EQUAÇÕES DE REGRESSÃO	R ²
P-resina +	0,0	Y= 0,5907***x+31,667***	0,9586
	0,5	Y= -0,0563**x ² +0,6458***x+37,87***	0,9824
Pi- NaHCO ₃ (0,5 mol L ⁻¹)	1,0	Y= 0,3992**x+35,192***	0,8407
	2,0	Y= -0,0783**x ² +0,9561***x+33,621***	0,9751
Po-NaHCO ₃ (0,5 mol L ⁻¹)	0,0	Y= -0,04*x ² +0,5673**x+4,5679***	0,7921
	0,5	Y= -0,0414*x ² +0,5115**x+5,3057***	0,7634
	1,0	Y= -0,0461*x ² +0,4735***x+4,2154***	0,8317
	2,0	Y= -0,0391x ² +0,5696x+4,6755	0,8827
Pi-NaOH (0,1 + 0,5 mol L ⁻¹)	0,0	Y= 2,8319***x+37,661***	0,9088
	0,5	Y= -0,327***x ² +5,2147***x+46,643***	0,9509
	1,0	Y= -0,2039***x ² +3,811***x+50,95***	0,9729
	2,0	Y= -0,1893x ² +3,1609x+49,835	0,9033
Po-NaOH (0,1 + 0,5 mol L ⁻¹)	0,0	Y= -0,0947***x ² +1,9278***x+12,575***	0,9890
	0,5	Y= -0,082**x ² +1,7477***x+15,321***	0,9368
	1,0	Y= -0,1116***x ² +2,127***x+14,742***	0,9634
	2,0	Y= -0,0893**x ² +1,5741**x+14,666***	0,9231
P-HCl (0,5 mol L ⁻¹) + P-residual	0,0	Y= 0,3012*x ² -0,086**x+199,33***	0,9196
	0,5	Y= 2,6716**x+208,77***	0,8936
	1,0	Y= 2,3508**x+193,75***	0,8837
	2,0	Y= 3,1491*x+192,56***	0,8625

***, ** e *: significativo a 0,1; 1 e 5 %, respectivamente.

Na Figura 5 observa-se a distribuição das formas de P em função da aplicação de matéria orgânica e calcário no solo LVAd-1. Nota-se comportamento crescente para todas as frações com a elevação das doses de esterco bovino. Com exceção das frações P-resina + Pi-NaHCO₃ (doses 0,5 e 1,0 de calcário), Po-NaHCO₃ (doses 0,0 e 1,0 de calcário), Pi-NaOH (dose 1,0 de

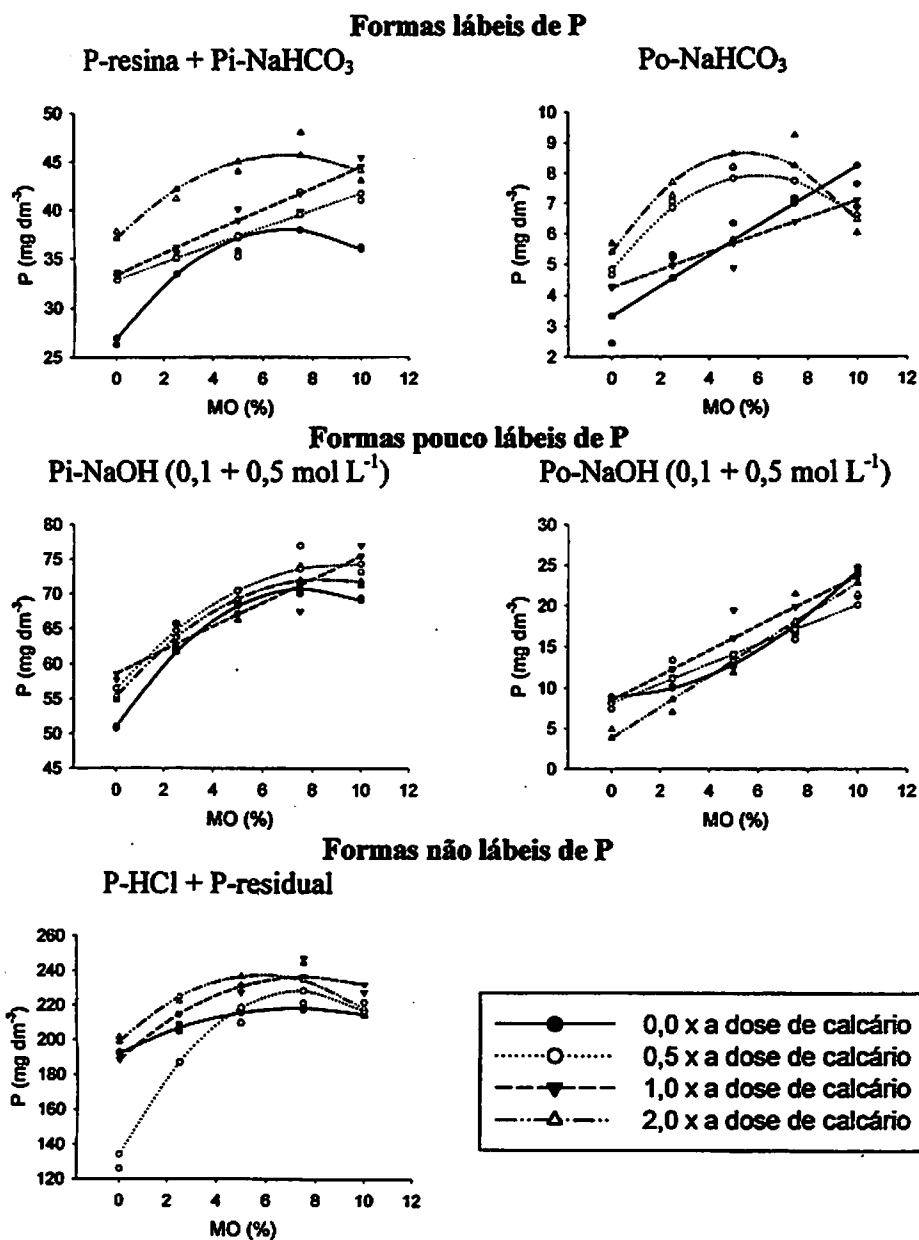


FIGURA 5. Teores de P (mg dm^{-3}) em amostras de solo LVAd-1, em função da aplicação de esterco bovino, em cada nível de calcário, para as diferentes formas de fósforo.

calcário) e o Po-NaOH (dose 0,5; 1,0 e 2,0 de calcário), que mostraram um ajuste linear, as demais formas apresentaram um ajuste quadrático crescente com o aumento das doses de esterco, passando por um máximo e decrescendo nas maiores doses de esterco bovino (Tabela 4).

TABELA 4. Equações de regressão ajustadas para as formas lábeis (P-resina+Pi-NaHCO₃ e Po-NaHCO₃); pouco lábeis (Pi e Po-NaOH 0,1+0,5 mol L⁻¹) e não lábeis de P (P-HCl+P-residual) (Y=mg dm⁻³) em função das doses de esterco bovino aplicadas (x=%) em cada nível de calcário (CAL) utilizado, no solo LVAd-1.

FORMAS DE P	CAL	EQUAÇÕES DE REGRESSÃO	R ²
P-resina	0,0	Y= -0,2259*x ² +3,1614***x+26,920***	0,9378
	0,5	Y= 0,8892**x+32,836***	0,8208
Pi- NaHCO ₃ (0,5 mol L ⁻¹)	1,0	Y= 1,1148***x+33,350***	0,9288
	2,0	Y= -0,1776*x ² +2,472**x+37,104***	0,8412
Po-NaHCO ₃ (0,5 mol L ⁻¹)	0,0	Y= 0,48937**x+3,3205***	0,8810
	0,5	Y= -0,08441*x ² +1,019794**x+4,823757***	0,8843
	1,0	Y= 0,28402**x+4,246***	0,7911
	2,0	Y= -0,108611*x ² +1,190894**x+5,39171***	0,8105
	0,0	Y= -0,3279***x ² +5,0825***x+51,025***	0,9966
	0,5	Y= -0,2017**x ² +3,7959**x+56,481***	0,9026
Pi-NaOH (0,1 + 0,5 mol L ⁻¹)	1,0	Y= 1,6816***x+58,61***	0,8854
	2,0	Y= -0,2274**x ² +3,9095***x+55,391***	0,9156
	0,0	Y= 0,1472***x ² +0,0624***x+8,888***	0,9876
Po-NaOH (0,1 + 0,5 mol L ⁻¹)	0,5	Y= 1,1936**x+8,1120***	0,8981
	1,0	Y= 1,5124**x+8,4920***	0,8576
	2,0	Y= 1,8928***x+3,840***	0,9219
P-HCl (0,5 mol L ⁻¹)	0,0	Y= -0,4877**x ² +7,1733***x+191,87***	0,9774
	0,5	Y= -1,7225*x ² +25,477**x+134,05***	0,9109
	1,0	Y= -0,8202*x ² +12,560*x+188,52***	0,8893
P-residual	2,0	Y= -1,1260*x ² +13,176*x+198,95***	0,8520

***; ** e *: significativo a 0,1; 1 e 5 %, respectivamente.

Nesse solo, independentemente das doses de matéria orgânica e calagem, predominaram as formas de P inorgânico, com ênfase para o P-residual. As formas não lábeis de P, compostas por frações relativamente insolúveis ligadas ao Ca e estáveis de Po e insolúveis de Pi e, portanto, não disponíveis em curto prazo, foram as responsáveis pela maior parte do fósforo total no solo. As formas pouco lábeis de P (Pi e Po-NaOH), com disponibilidade restrita à absorção vegetal, foram as que apresentaram o maior crescimento relativo, sendo essa fração de P uma importante fonte ao suprimento das necessidades da planta. Esses resultados corroboram com dados observados por Araújo & Salcedo (1997) e Schmidt et al. (1996). Essas formas são consideradas frações com disponibilidade restrita, se comportando como um reservatório (fator quantidade) no solo (Hedley et al., 1982; Tiessen et al., 1984; Novais & Smyth, 1999).

Tal como observado no solo RQo (Figura 4), apenas o P-resina+Pi-NaHCO₃ apresentaram incrementos com o aumento nas doses de calcário (Figura 5). As demais formas de P não apresentaram uma tendência definida com aumentos da calagem.

Na Figura 6 constata-se o comportamento das formas de P em função da aplicação de esterco bovino e calcário no solo LVAd-2, onde se observa que, de modo geral, todas as formas de P apresentaram um comportamento crescente linear com a elevação das doses de esterco, à exceção das frações lábeis (doses 0,0 e 0,5 de calcário), pouco lábeis de Pi-NaOH (doses 0,0; 0,5 e 2,0 de calcário) e a forma não lábil (dose 2,0 de calcário), que apresentaram ajustes quadráticos crescentes, passando por um máximo e decrescendo nas doses mais elevadas de esterco bovino (Tabela 5).

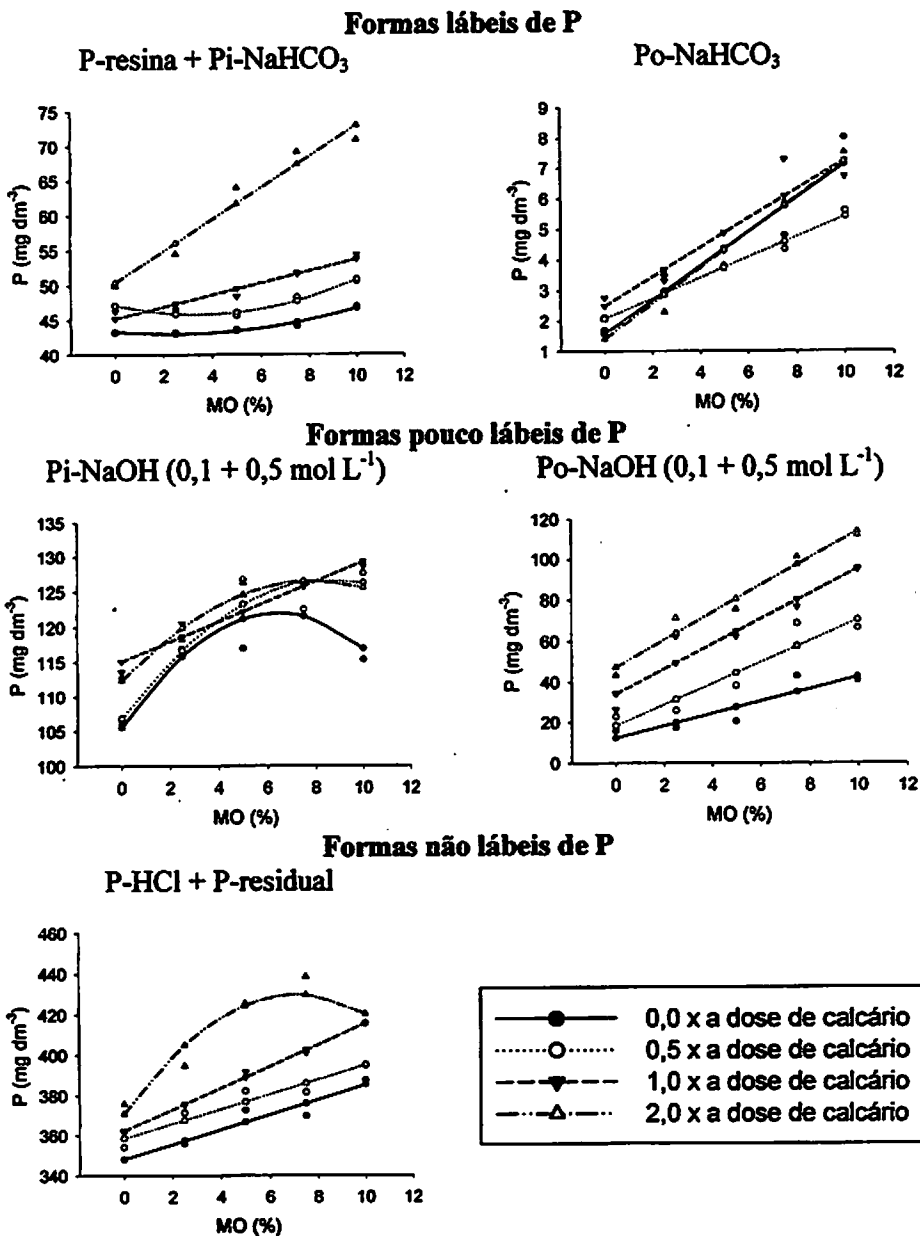


FIGURA 6. Teores de P (mg dm^{-3}) em amostras de solo LVAd-2, em função da aplicação de esterco bovino, em cada nível de calcário, para as diferentes formas de fósforo.

TABELA 5. Equações de regressão ajustadas para as formas lábeis (P-resina+Pi-NaHCO₃ e Po- NaHCO₃); pouco lábeis (Pi e Po-NaOH 0,1+0,5 mol L⁻¹) e não lábeis de P (P-HCl+P-residual) (Y=mg dm⁻³) em função das doses de esterco bovino aplicadas (x=%) em cada nível de calcário (CAL) utilizado, no solo LVAd-2.

FORMAS DE P	CAL	EQUAÇÕES DE REGRESSÃO	R ²
P-resina	0,0	Y= 0,0632*x ² -0,294**x+43,308***	0,9551
	0,5	Y= 0,1129**x ² -0,7659***x+47,103***	0,9700
Pi- NaHCO ₃ (0,5 mol L ⁻¹)	1,0	Y= 0,8452***x+45,242***	0,9316
	2,0	Y= 2,2592***x+50,368***	0,9541
Po-NaHCO ₃ (0,5 mol L ⁻¹)	0,0	Y= 0,5568**x+1,564***	0,8918
	0,5	Y= 0,3344**x+2,068***	0,9872
	1,0	Y= 0,476**x+2,494***	0,8607
	2,0	Y= 0,5812***x+1,404***	0,9507
	0,0	Y= -0,3962*x ² +5,0939*x+105,560***	0,7955
	0,5	Y= -0,2656*x ² +4,5920**x+106,810***	0,9005
Pi-NaOH (0,1 + 0,5 mol L ⁻¹)	1,0	Y= 1,4136**x+115,10***	0,9522
	2,0	Y= -0,2254*x ² +3,5721***x+112,340***	0,9582
Po-NaOH (0,1 + 0,5 mol L ⁻¹)	0,0	Y= 3,0160**x+12,3380***	0,8101
	0,5	Y= 5,1982**x+18,350***	0,8816
	1,0	Y= 6,0856**x+34,2001**	0,9048
2,0	Y= 6,6556***x+47,2481***	0,9609	
P-HCl (0,5 mol L ⁻¹)	0,0	Y= 3,7056**x+348,13001***	0,9117
	0,5	Y= 3,6407***x+358,520***	0,9125
+ P-residual	1,0	Y= 5,3184***x+362,341***	0,9951
	2,0	Y= -1,1546*x ² +16,485*x+370,83***	0,9064

***, ** e *: significativo a 0,1; 1 e 5 %, respectivamente.

Nesse solo, predominaram as formas inorgânicas de P, e o Po-NaOH (forma com disponibilidade restrita) teve uma participação significativa. Como a maior parte do fósforo disponível às plantas são provenientes da matéria orgânica, os processos biológicos influenciam bastante a distribuição das formas de P no solo (Smeck, 1985; Walbridge, 1991). Processos biológicos regulam a dinâmica e distribuição de formas lábeis de P, e a reciclagem da forma orgânica é um importante fator na disponibilização desse nutriente às plantas (Acquaye, 1963; Adeptu & Corey, 1976; Harrison, 1982; Stewart & Tiessen, 1987).

As formas pouco lábeis, que representam o fator quantidade de P no solo (Novais & Smyth, 1999; Hedley et al., 1982), comportando-se como um reservatório de P às plantas, representaram um compartimento apreciável do nutriente nesse solo, sendo considerado com fonte e dreno (Novais & Smyth, 1999). Independentemente das doses de MO ou calagem, a fração não lábil (P-HCl + P-residual), composta por formas não disponível em curto prazo, contribuiu com a maior parte do P total no solo.

Na Figura 6 observa-se, ainda, que a elevação das doses de calcário promoveu incrementos nos teores de P nas formas de P-resina+Pi-NaHCO₃, Po-NaOH (0,1+0,5 mol L⁻¹) e P-HCl+P-residual.

Avaliando o comportamento do solo LVd (Figura 7), verifica-se que, com exceção da fração de Po-NaOH (na dose 0,5 de calcário), que apresentou redução, de maneira geral, as outras frações apresentaram um comportamento crescente com o aumento na dose de MO (Tabela 6). Estando de acordo com resultados de Tiessen et al. (1992), os quais observaram que diferentes sistemas de manejo do solo, a calagem e adição de matéria orgânica alteram grandemente a dinâmica e transformações de P. Em estudos conduzidos em cafeeiros cultivados em Latossolo Roxo distrófico, foi observado que as principais transformações de P foram devidas às alterações nos valores de pH e nos teores de matéria orgânica desse solo (Pavan & Chaves, 1996). Resultados semelhantes foram obtidos por Zheng et al. (2004), estudando o efeito da aplicação de fertilizantes minerais e chorume bovino sobre a dinâmica e formas de fósforo no solo. Nesse solo, independentemente das doses de esterco bovino, predominaram as formas inorgânicas de P, principalmente formas não lábeis, compostas por frações relativamente insolúveis ligadas ao Ca, estáveis de Po e insolúveis de Pi, que não são disponíveis em curto prazo (Novais & Smyth, 1999).

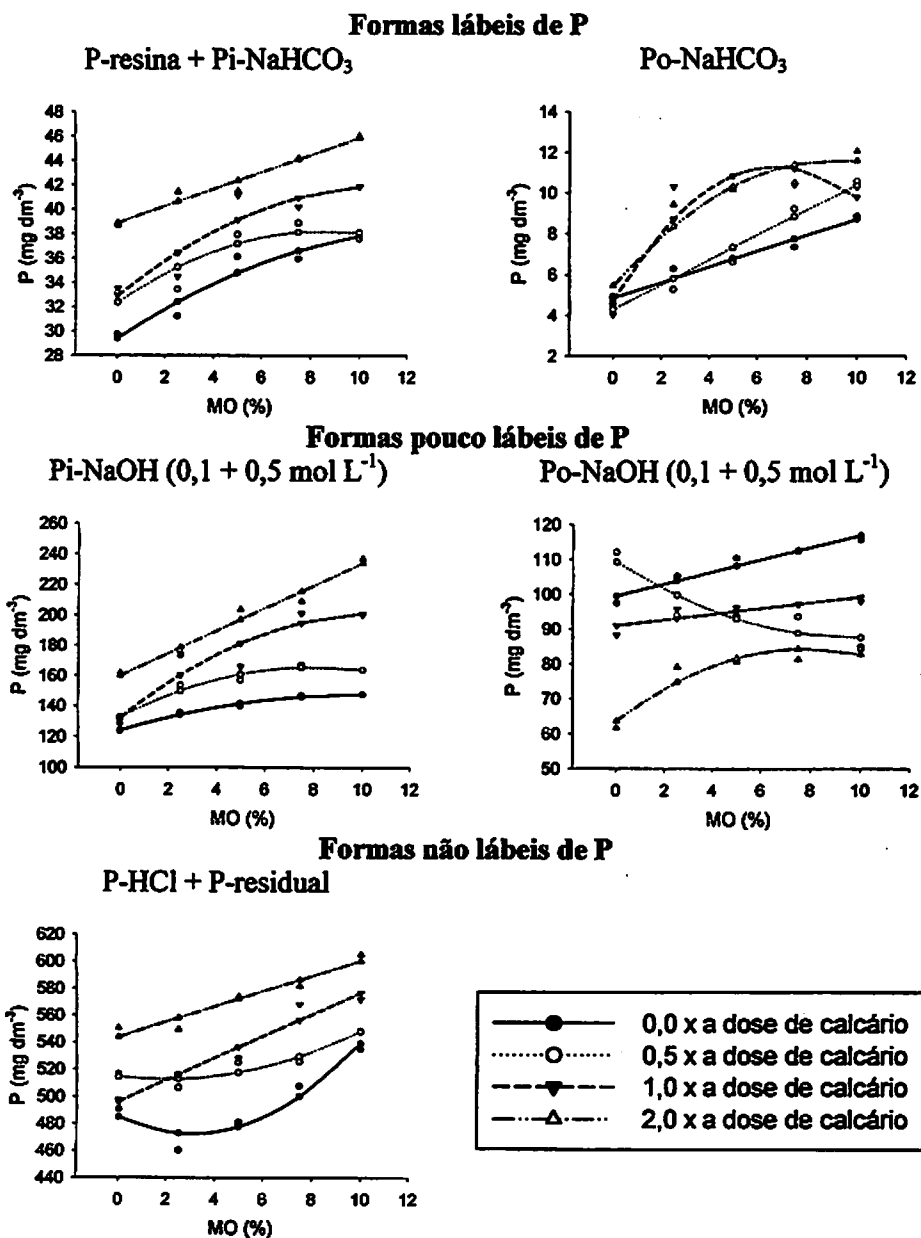


FIGURA 7. Teores de P (mg dm^{-3}) em amostras de solo LVd, em função da aplicação de esterco bovino, em cada nível de calcário, para as diferentes formas de fósforo.

TABELA 6. Equações de regressão ajustadas para as formas lábeis (P-resina+Pi-NaHCO₃ e Po- NaHCO₃); pouco lábeis (Pi e Po-NaOH 0,1+0,5 mol L⁻¹) e não lábeis de P (P-HCl+P-residual) (Y=mg dm⁻³) em função das doses de esterco bovino aplicadas (x=%) em cada nível de calcário (CAL) utilizado, no solo LVd.

FORMAS DE P	CAL	EQUAÇÕES DE REGRESSÃO	R ²
P-resina + Pi- NaHCO ₃ (0,5 mol L ⁻¹)	0,0	Y= -0,0475*x ² +1,3138**x+29,393***	0,9246
	0,5	Y= -0,0784*x ² +1,3527*x+32,351**	0,8180
	1,0	Y= -0,0699*x ² +1,5890**x+32,9120**	0,8558
	2,0	Y= 0,6952**x+38,8730***	0,9539
Po-NaHCO ₃ (0,5 mol L ⁻¹)	0,0	Y= 0,3804***x+4,862***	0,9510
	0,5	Y= 0,6044***x+4,294***	0,9455
	1,0	Y= -0,14332*8x ² +1,934201*x+4,750386***	0,8599
	2,0	Y= -0,071489**x ² +1,324716**x+5,47149***	0,9124
Pi-NaOH (0,1 + 0,5 mol L ⁻¹)	0,0	Y= -0,2248***x ² +4,6061***x+124,150***	0,9876
	0,5	Y= -0,5039**x ² +8,1761***x+132,510***	0,9603
	1,0	Y= -0,5902*x ² +12,7780*x+132,071***	0,8674
	2,0	Y= 7,4320**x+159,7889***	0,9657
Po-NaOH (0,1 + 0,5 mol L ⁻¹)	0,0	Y= 1,7420**x+99,4620***	0,9385
	0,5	Y= 0,2216*x ² -4,390**x+109,260***	0,8167
	1,0	Y= 0,8088*x+91,004**	0,7017
	2,0	Y= -0,3379*x ² +5,2830**x+63,6620**	0,8912
P-HCl (0,5 mol L ⁻¹) + P-residual	0,0	Y= 1,3767*x ² -8,3253*x+485,030***	0,9112
	0,5	Y= 0,5470*x ² -2,1153*x+514,53**	0,8834
	1,0	Y= 8,0743**x+496,050***	0,9470
	2,0	Y= 5,6740**x+543,820***	0,9226

***; ** e *: significativo a 0,1; 1 e 5 %, respectivamente.

Das formas com certa disponibilidade à absorção vegetal, as frações inorgânicas pouco lábeis (Pi-NaOH) apresentaram o maior incremento relativo com a aplicação de esterco bovino, indicando que nessa fração se encontra a maior fonte de P ao suprimento das necessidades da planta. Essas formas são consideradas frações com disponibilidade restrita, comportando-se como um reservatório (fator quantidade) no solo (Hedley et al., 1982; Tiessen et al., 1984; Novais & Smyth, 1999).

Independentemente dos tratamentos, os valores de P-lábil total (P-resina+Pi-bic+Po-bic) decresceram na seguinte ordem: LVAd-2>LVd>

LVAd-1>RQo. Essa seqüência é inversa à observada para o P-Mehlich-1, indicando que, dependendo do solo, esse extrator pode não extrair todas as formas de P lábeis e não considera o fator capacidade do solo. Para os valores de P pouco lábil (Pi-NaOH 0,1+Po-NaOH 0,1+Pi-NaOH 0,5+Po-NaOH 0,5) e não lábil (P-HCl+P-residual), a ordem decrescente foi: LVd>LVAd-2>LVAd-1>RQo.

Verificou-se que houve influência da textura, mineralogia e do teor de matéria orgânica do solo em todas as frações de P, indicando que, para o adequado manejo da adubação fosfatada, deve-se considerar os atributos do solo ligados ao fator capacidade, independentemente da aplicação de resíduos orgânicos e/ou calcário.

Para os quatro solos, independente dos tratamentos, o Pi-NaHCO₃ (Pi-lábil) foi a forma que mais contribuiu para o P-lábil total. Segundo Hedley et al. (1982), as formas de Pi-lábil são as que mais contribuem para o P lábil total em solos que receberam adubação com fertilizantes minerais.

As formas inorgânicas foram as que mais contribuíram para o P pouco lábil total. O hidróxido de sódio extrai formas de P consideradas de baixa disponibilidade para as plantas, associadas a fosfatos amorfos e cristalinos de Fe e Al (Willian et al., 1980), porém, em solos de regiões tropicais, essas formas são relativamente dinâmicas (Tiessen et al., 1992).

O aumento das formas de P pouco lábil com a aplicação de calcário pode ser devida à oxidação da matéria orgânica e aumento dos valores de Al e Fe amorfo nesses solos durante o período de incubação (Fernandes et al., 2002; Farnor & Mitchell, 1963). Ainda, segundo Fernandes et al. (1998), com a aplicação de calcário, ocorre uma dispersão dos vários compostos presentes no solo pela elevação do pH, expondo cargas elétricas positivas que adsorvem P e, também, a formação de precipitados de Al, que podem adsorver o P. Os

polímeros de hidróxidos de Al recém-formados apresentam alta afinidade por P (Haynes, 1984).

Nos quatro solos estudados, o P-residual foi a forma que mais contribuiu para o P não lábil total (P-HCl+P-residual), independente da aplicação de resíduo orgânico e/ou calcário. Segundo Fernandes et al. (2002), Araújo et al. (1993) e Pavan & Chaves (1996), esse resultado é esperado em solos ácidos. O P residual representa o P ocluso, retido pela hematita, goethita e gibbsita (Smeck, 1985), o que explica os maiores teores dessa forma de P nos solos mais intemperizados e com teores mais elevados de óxidos de Al e Fe. A forma de P-HCl, que compreende as formas de P ligadas ao cálcio, embora considerada de baixa solubilidade em solos tropicais, não é tão estável, podendo ser disponível às plantas (Araújo et al., 1993).

Quanto à contribuição das formas de P lábil, pouco lábil e não lábil para o P total dos solos, independentemente dos tratamentos, verificou-se uma pequena participação da P lábil, sendo as formas de P não lábeis as que mais contribuíram para o P total dos solos estudados. Fernandes et al. (2002), trabalhando com solos de várzea do sul de Minas Gerais e Ivanoff et al. (1998) com Histosols de Everglades do sul da Florida (EUA), também verificaram uma pequena participação do P lábil no P total dos solos.

Resultados obtidos por Thompson & Black (1970), Hedley et al. (1982), O'Halloran et al. (1987), Pavan & Leal (1995), Pavan & Filho (1995), Iyamuremye et al. (1996), Beck & Sanchez (1996), Nziguheba et al. (1998) e Tokura et al (2002) demonstram a influência de diferentes práticas, como a calagem, adição de fontes ou doses de matéria orgânica e os sistemas de cultivo sobre as transformações das formas de P no solo.

4 CONCLUSÕES

A adição de calcário e esterco bovino incrementou os teores de P Mehlich-1, principalmente nos solos menos oxidicos e com textura mais arenosa.

Em geral, a adição de esterco bovino promoveu incrementos em todas as formas de fósforo no solo. Independentemente da aplicação de esterco bovino, as formas pouco lábeis (Po ligado a compostos húmicos e Pi ligado a Fe e Al) apresentaram uma contribuição substancial para o P disponível às plantas. Porém, nos quatro solos estudados, predominaram as formas não lábeis de P.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACQUAYE, D. K. Some significance of soil organic phosphorus mineralization in the phosphorus nutrition of cocoa in Ghana. *Plant and Soil*, Dordrecht, v. 19, n. 1, p. 65-80, 1963.

ADEPETU, J. A.; COREY, R. B. Organic phosphorus as a predictor of plant available phosphorus in soils of Southern Nigeria. *Soil Science*, Baltimore, v. 122, n. 2, p. 159-164, Aug. 1976.

ALVAREZ V., V. H. **Avaliação da fertilidade do solo (Superfícies de resposta – Modelos aproximativos para expressar a relação fator-resposta)**. Viçosa: UFV. Imprensa Universitária, 1994. 75 p.

ALVAREZ V., V. H.; FONSECA, D. M. Definição de doses de fósforo para determinação da capacidade máxima de adsorção de fosfatos e para ensaios de casa de vegetação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 14, n. 1, p. 48-55, jan./abr. 1990.

ARAÚJO, M. S. B.; 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, v. 21, n. 4, p. 643-650, out./dez. 1997.

ARAÚJO, M. S. B.; SALCEDO, I. H.; SAMPAIO, E. V. S. B. Efeito de fertilizações fosfatadas anuais em solo cultivado com cana-de-açúcar. II. Formas disponíveis e efeito residual do P acumulado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 17, n. 3, p. 397-403, set./dez. 1993.

BAHIA FILHO, A. F. C.; BRAGA, J. M.; RESENDE, M.; RIBEIRO, A. C. Relação entre adsorção de fósforo e componentes mineralógicos da fração argila de latossolos do planalto central. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 7, n. 3, p. 221-226, set./dez. 1983.

BECK, M. A.; SANCHEZ, P. A. Soil phosphorus movement and budget after 13 years of fertilized cultivation in the Amazon basin. *Plant and Soil*, Dordrecht, v. 184, n. 1, p. 23-31, 1996.

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

CURI, N.; CAMARGO, O. A.; GUEDES, A.; SILVEIRA, J. V. Sorção de fósforo em materiais de latossolos do Brasil sudeste. In: REUNIÃO DE CLASSIFICAÇÃO, CORRELAÇÃO DE SOLOS E INTERPRETAÇÃO DA APTIDÃO AGRÍCOLA, 3., 1988, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: EMBRAPA-SNLCS/SBCS, 1988. p. 267-282.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solo. *Manual de métodos de análise de solo*. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura, 1997. 212 p.

FARMER, V. C.; MITCHELL, B. D. Occurrence of oxalates in soil clays following hydrogen peroxide treatment. *Soil Science*, Baltimore, v. 96, n. 3, p. 221-229, Mar. 1963.

FERNANDES, L. A.; FURTINE NETO, A. E.; CURI, N.; LIMA, J. M.; GUEDES, G. A. A. Fósforo e atividade de fosfatase em dois solos sob diferentes condições de uso. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 33, n. 7, p. 1159-1170, jul. 1998.

FERNANDES, L. A.; FAQUIN, V.; FURTINI, A. E.; CURI, N. Formas de fósforo em solos de várzea e biodisponibilidade para o feijoeiro. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 37, n. 3, p. 373-383, mar. 2002.

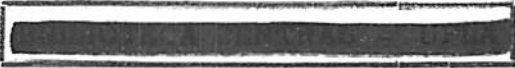
FERREIRA, D. F. Análises estatísticas por meio do SISVAR (Sistema para Análise de Variância) para Windows versão 4. 0. In: REUNIÃO ANUAL DA REGIÃO BRASILEIRA DA SOCIEDADE INTERNACIONAL DE BIOMETRIA, 45., 2000, São Carlos. *Anais...* São Carlos: UFSCar, 2000. p. 255-258.

HARRISON, A. F. Labile organic phosphorus mineralization in relation to soil properties. *Soil Biology Biochemistry*, Oxford, v. 14, n. 4, p. 343-351, 1982.

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

HEDLEY, M. J.; STEWART, J. W. B.; GHAUHAN, B. S. Changes in inorganic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and laboratory incubations. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 46, n. 4, p. 970-976, July/Aug. 1982.

- HUE, N. V. Effects of organic acids/anions on sorption and phytoavailability in soils with different mineralogies. *Soil Science*, Baltimore, v. 152, n. 6, p. 463-471, 1991.
- IVANOFF, D. B.; REDDY, K. R.; ROBINSON, S. Chemical fractionation of organic phosphorus in selected histosols. *Soil Science*, Baltimore, v. 163, n. 1, p. 36-45, Jan. 1998.
- IYAMUREMYE, F.; DICK, R. P.; BAHAN, J. Organic amendments and phosphorus dynamics: II. Distribution of soil phosphorus fractions. *Soil Science*, Baltimore, v. 161, n. 7, p. 436-443, July 1996.
- KHURI, A. I.; CORNELL, J. A. *Response surfaces—designs and analyses*. 2 ed. New York, 1996. v. 152, 510 p.
- LARSEN, S. Soil phosphorus. *Advances in Agronomy*, New York, v. 19, p. 151-211, 1967.
- MESQUITA FILHO, M. V.; TORRENT, J. Phosphate sorption as related to mineralogy of a hydrosequence of soils from the Cerrado region (Brazil). *Geoderma*, Amsterdam, v. 58, p. 107-123, 1992.
- McBRIDE, M. B. *Environmental chemistry of soils*. New York: Oxford University Press, 1994. 406 p.
- MURPHY, J.; RILEY, J. P. A modified single solution methods for the determination of phosphate in natural waters. *Analitica Chimica Acta*, Amsterdam, v. 26, n. 1, p. 31-36, 1962.
- NOVAIS, R. F.; SNYTH, T. J. *Fósforo em solo e planta em condições tropicais*. Viçosa: UFV/DPS, 1999. 399 p.
- NZIGUHEBA, G.; PALM, C. A.; BURESH, R. J.; SMITHSON, P. C. Soil phosphorus fractions and adsorption as affected by organic and inorganic sources. *Plant and Soil*, Dordrecht, v. 198, n. 2, p. 159-168, Jan. 1998.
- O'HALLORAN, I. P.; STEWART, J. W.; JONG, E. de. Changes in forms and available as influenced by management practices. *Plant and Soil*, Dordrecht, v. 100, p. 113-126, 1987.



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**, Viçosa, v. 20, n. 2, p. 251-256, maio/ago. 1996.

PAVAN, M. A.; FILHO, A. A. fracionamento de fósforo em um experimento de manejo e fertilidade do solo para a produção de café no noroeste do Paraná. **Arquivos de Biologia e Tecnologia**, Curitiba, v. 38, n. 1, p. 157-165, jan./mar. 1995.

PAVAN, M. A.; LEAL, A. C. Utilização de uma técnica de fracionamento para caracterizar formas de fósforo em solo incubado com resíduos de leucena. **Arquivos de Biologia e tecnologia**, Curitiba, v. 38, n. 1, p. 375-383, jan./mar. 1995.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical computing, Vienna, Austria. 2004. Disponível em: <<http://www.R-project.org>>. Acesso em: 21 dez. 2004.

SCHMIDT, J. P.; BUOL, S. W.; KANPRATH, E. J. Soil phosphorus dynamic during seventeen of continuous cultivation: fractionation analyses. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 60, n. 4, p. 1168-1172, July/Aug. 1996.

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.

SMECK, N. E. Phosphorus dynamics in soils and landscapes. **Geoderma**, Amsterdam, v. 36, n. 3/4, p. 185-199, Dec. 1985.

STEWART, J. W. B.; TIESSEN, H. Dynamics of soil organic phosphorus. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 4, n. 1, p. 41-60, 1987.

TATE, K. R.; SALCEDO, I. H. Phosphorus control of soil organic matter accumulation and cycling. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 5, n. 1, p. 99-107, 1988.

THOMPSON, E. J.; BLACK, C. A. change in extractable organic phosphorus in soil in the presence and absence of plants – III. Phosphatase effects. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 32, p. 335-348, 1970.

TIESSEN, H.; SALCEDO, I. H.; SAMPAIO, E. V. S. B. Nutrients and soil organic matter dynamic under shifting cultivation in semi-arid northeastern Brazil. *Agriculture Ecosystems Environment*, Amsterdam, v. 39, n. 3, p. 139-159, 1992.

TIESSEN, H.; STEWART, J. W. B.; COLE, C. V. Pathways of phosphorus transformations in soils of differing pedogenesis. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 48, n. 4, p. 853-858, July/Aug. 1984.

TOKURA, A. M.; FURTINI NETO, A. E.; CURI, N.; FAQUIN, V.; KURIHARA, C. H.; ALOVISI, A. A. Formas de fósforo sob plantio direto em razão da profundidade e tempo de cultivo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 37, n. 10, p. 1467-1476, out. 2002.

TURRIÓN, M. B.; GLASER, B.; SOLOMON, D. Effects of deforestation on phosphorus pools in mountain soils of the Alay Range, Khyrgyzia. *Biology and Fertility of soils*, Berlin, v. 31, n. 5, p. 134-142, July 2000.

WALBRIDGE, M. R. Phosphorus availability in acidic organic soils of the lower North Carolina coastal plain. *Ecology*, Washington, v. 72, n. 6, p. 2083-2100, Dec. 1991.

WILLIAM, J. D. H.; MAYER, T.; NRIAGU, J. O. Extractability of phosphorus minerals common in soils and sediments. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 44, n. 3, p. 462-465, May/June 1980.

ZHENG, Z.; McLEOD, J. A.; SANDERSON, J. B.; LAFOND, J. Soil phosphorus dynamics after annual applications of mineral fertilizers and liquid dairy manure: fractionation and path analyses. *Soil Science*, Baltimore, v. 169, n. 6, p. 449-456, June 2004.

CAPÍTULO IV

NUTRIÇÃO FOSFATADA E RENDIMENTO DO FEJJOEIRO SOB INFLUÊNCIA DA CALAGEM E ADUBAÇÃO ORGÂNICA

RESUMO

SOUZA, Renato Ferreira de. Nutrição fosfatada e rendimento do feijoeiro sob influência da calagem e adubação orgânica. In: ____ **Dinâmica de fósforo em solos sob influência da calagem e adubação orgânica, cultivados com feijoeiro**. 2005. p.101-141. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.¹

O fósforo é um dos mais limitantes nutrientes ao desenvolvimento do feijoeiro, estando envolvido em funções importantes como fotossíntese, respiração, função celular, estruturas genéticas e ciclo energético. A sua alta adsorção aos componentes mineralógicos do solo e a sua baixa disponibilidade para as plantas faz com que haja necessidade da aplicação de altas doses de fertilizantes fosfatados para o suprimento das exigências da cultura, com custos bastante elevados. Práticas de manejo do solo, como aumento do teor de matéria orgânica e a calagem, são bastante eficazes na redução do fenômeno de adsorção de P no solo e aumento de sua disponibilidade para a absorção vegetal. Objetivando avaliar o efeito de doses de esterco bovino e calcário sobre a nutrição fosfatada e produção do feijoeiro, foram conduzidos, em casa-de-vegetação do Departamento de Ciência do Solo da universidade Federal de Lavras quatro experimentos utilizando-se o delineamento inteiramente ao acaso, em esquema fatorial 5x4 e quatro repetições, em vasos contendo 3 dm³ de amostras dos solos Neossolo Quartzarênico órtico textura arenosa (RQo), Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico textura média (LVAd-1), Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico textura argilosa (LVAd-2) e Latossolo Vermelho distrófico textura muito argilosa (LVd), onde cultivaram-se três plantas de feijoeiro. Os tratamentos foram constituídos pela aplicação de 5 doses de esterco bovino (0; 2,5; 5,0; 7,5 e 10% do volume do solo) e 4 níveis de calagem (0,0; 0,5; 1 e 2 vezes a dose recomendada para atingir V=60%). Foram avaliados as produções matéria seca da parte aérea na fase de florescimento (MSPA-R6) e final do ciclo da cultura (MSPA-R9), a produção de matéria seca de grãos (MSGR) e os teores de P na MSPA-R6 e seu acúmulo na MSPA-R9 + MSGR. A adição de esterco bovino e calagem afetou positivamente a absorção e acúmulo de fósforo, o acúmulo de matéria seca da parte aérea (MSPA-R6 e R9) e produção de grãos pelo feijoeiro.

¹ Comitê Orientador: Prof. Valdemar Faquin - UFLA (Orientador), Prof. Luiz Arnaldo Fernandes – NCA/UFMG.

ABSTRACT

SOUZA, Renato Ferreira de. Phosphate nutrition and yield of the bean plant under the influence of liming and organic manuring. In: ____ **Phosphorus dynamics in soils under the influence of liming and organic manuring, cultivated with bean plant.** 2005. p.101-141. Thesis (Doctor of Science in Soil Science and Plant Nutrition) – Federal University of Lavras, Lavras, MG.¹

Phosphorus is one of the most limiting nutrients to the development of the bean plant, being involved in important functions such as photosynthesis, respiration, cellular function, genetic structures and the energy cycle. Its high adsorption to mineralogical components of the soil and low availability for the plants absorption makes applications of high doses of phosphate fertilizers necessary to meet the demands of the culture, with quite a high cost. Soil management practices, such as the increase in the level of organic matter and liming are quite effective in the reduction of the phenomenon of adsorption of P in the soil and increase of its readiness for plant absorption. Aiming to evaluate the effect of doses of bovine manure and lime on the phosphate nutrition and production of the bean plant, four experiments were conducted in the greenhouse of the Soil Science Department of the Federal University of Lavras, the layout used being entirely randomized, in 5x4 factorial outline with four repetitions, in vases containing 3 dm³ of soil samples of ortic Quartzarenic Neosol sand texture, dystrophic Red-Yellow Latosol sandy clay loam texture, dystrophic Red-Yellow Latosol sandy clay texture and dystrophic Red Latosol clay texture, in which three bean plants were cultivated. The treatments were made up of the application of five doses of bovine manure (0; 2,5; 5,0; 7,5 and 10 % of the volume of the soil) and four liming levels (0,0; 0,5; 1 and 2 times the dose recommended to reach V=60%). Appraised was the dry matter production of the aerial part at the flowering phase (DMAP-R6) and at the end of the cycle of the culture (DMAP-R9), the production of dry matter of grains (DMGR) and the levels of P in DMAP-R6 and its accumulation in DMAP-R9 + DMGR. The addition of bovine manure and liming affected, positively, the absorption and phosphorus, the accumulation accumulation of dry matter of the aerial part (DMAP -R6 and R9) and the production of grains by the bean plant.

¹ Guidance Committee: Prof. Valdemar Faquin - UFLA (Adviser), Prof. Luiz Arnaldo Fernandes – NCA/UFMG.

1 INTRODUÇÃO

O feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) é uma das culturas mais difundidas no Brasil, tendo, além do caráter econômico, um alto significado social, por ser um alimento básico para a população. Entretanto, apesar de sua importância, ainda apresenta uma produtividade relativamente baixa. Os principais fatores responsáveis por essa baixa produtividade estão relacionados à baixa fertilidade e presença de elementos tóxicos no solo, aos aspectos relacionados com o suprimento hídrico (deficiência ou excesso de água) e ao baixo nível tecnológico utilizado no manejo da cultura.

O fósforo é um elemento essencial ao crescimento e reprodução das plantas, as quais não alcança seu máximo potencial produtivo sem um adequado suprimento nutricional (Marschner, 1995). O fósforo é componente de compostos importantes das células vegetais, incluindo fosfato presente nas moléculas de açúcares, intermediários da respiração e fotossíntese, bem como dos fosfolípidos que compõem as membranas vegetais. É, também, componente de nucleotídeos utilizados no metabolismo energético das plantas (como ATP) e dos ácidos nucleicos (Taiz & Zeiger, 2004).

A influência do suprimento de fósforo sobre a produção do feijoeiro tem sido estudada em diversos trabalhos, citando-se Parra & Miranda (1980); Oliveira et al. (1987); Fageria & Santos (1998), confirmando a grande importância desse nutriente para a cultura, embora seja, entre os macronutrientes, o menos exigido. Entretanto, esse nutriente é considerado de maior limitação nutricional ao desenvolvimento das culturas nos solos das regiões tropicais. Isso é devido à alta fixação do P aos componentes mineralógicos do solo, concorrendo para os valores extremamente baixos de fósforo em solução (P-disponível). Embora o teor total de P no solo se situe entre 200 e 3000 mg kg⁻¹, na maioria das vezes, menos de 0,1% (0,2 a 3 mg kg⁻¹)

mg de dm^{-3} S, parceladas em cinco vezes durante o ciclo da cultura. Durante o período experimental, a umidade dos solos foi mantida em 60 % do volume total de poros (Freire et al., 1980) utilizando água deionizada.

Uma planta de cada parcela experimental foi colhida no estágio de florescimento (estádio R6) e as outras duas conduzidas até a maturidade fisiológica dos grãos (estádio R9). Na colheita, a parte aérea das plantas foi separada em folhas, caules e vagens.

O material vegetal foi seco em estufa de circulação forçada de ar, à temperatura entre 65 e 70°C. Avaliou-se o acúmulo de matéria seca da parte aérea nas plantas colhidas no florescimento (MSPA-R6) e no final do ciclo (MSPA-R9) e produção de grãos (MSGR). Foram, também, determinados os teores de P na MSPA-R6, MSPA-R9 e MSGR. Relacionando os teores de P na MSPA-R9 e MSGR, determinou-se o P acumulado na parte aérea total (MSPA-R9 +MSGR) no final do ciclo. O teor de P foi determinado pela digestão nítrico-perclórica (Malavolta et al., 1997) e a leitura nos extratos foi feita por colorimetria, segundo Braga & Defelipo (1974).

Para as variáveis estudadas, foram ajustados modelos de regressão múltipla (superfícies de resposta) em função das doses de calcário e de esterco bovino (Khuri & Cornell, 1996 e Alvarez V., 1994). A adoção do sistema linear formado pelas derivadas parciais das equações da superfície de resposta igualada a zero forneceu os valores críticos, que corresponde aos valores máximos, mínimos ou nenhum deles, de acordo com o comportamento específico da variável em estudo. Sobre o espaço fatorial da superfície de resposta, foram feitos cortes horizontais, obtendo-se isoquantas correspondentes a diferentes faixas de valores da variável resposta em função das variáveis explicativas. Foi utilizado o programa de análises estatísticas R (R Development Core Team, 2004).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os modelos ajustados, para todas as variáveis, foram selecionados conforme o procedimento stepwise, isto é, baseando-se em um modelo geral (completo), selecionou-se um modelo menor (submodelo), o qual forneceu uma boa explicação da variável resposta em função das variáveis explicativas (Khuri & Cornell, 1996). O procedimento stepwise permitiu a seleção de modelos em que todos os parâmetros foram significativos. Para as variáveis resposta MSPA-R6 (no solo LVAd-1) e MSPA-R9 (no solo LVAd-2), considerou-se um parâmetro não significativo, dada a sua importância do ponto de vista prático.

3.1 Produção de matéria seca da parte aérea do feijoeiro no estágio de florescimento

A variação do acúmulo de matéria seca na parte aérea no estágio de florescimento do feijoeiro (MSPA-R6) no solo LVAd-2 não está sendo explicada pelos fatores matéria orgânica e calcário, conforme a análise de variância da Tabela 1, em que apenas o fator calcário foi significativo a 5 %. Assim, não se justificou o ajuste de um modelo, dado que a variação foi explicada pela média geral, ou seja, pelo intercepto (32,65g vaso⁻¹).

As doses de matéria orgânica e calcário afetaram significativamente a produção de MSPA-R6 nos solos RQo, LVAd-1 e LVd. Para o solo RQo, a maior produção de MSPA-R6 (31,22 g vaso⁻¹) foi obtida utilizando-se a dose 10,0 % de matéria orgânica e 2 vezes a dose de calcário; o solo LVAd-1 (29,25 g vaso⁻¹) com o uso da dose 7,74 % de matéria orgânica e 1,5 vez a dose de calcário e o solo LVd (36,61 g vaso⁻¹) quando usou-se a dose 6,89 % de matéria orgânica e 1,25 vez a dose de calcário, conforme mostrado nas Figuras 1 e 2 e nas Tabelas 2 e 3. Para os solos LVAd-1 e LVd, houve uma tendência de

redução da produção de matéria seca da parte aérea nos extremos das doses de calcário e matéria orgânica. Isso ocorreu, possivelmente, pela redução da disponibilidade de alguns nutrientes com a dose excessiva de calcário, principalmente dos micronutrientes catiônicos e formação de compostos de baixa solubilidade de P ligado a cálcio.

Na Figura 2, observam-se os cortes horizontais feitos sobre o espaço fatorial da superfície de resposta, obtendo-se várias curvas onde todas as combinações das doses de matéria orgânica e calcário resulta na mesma produção.

A produção vegetal é o melhor indicador da disponibilidade de nutrientes para as plantas. No presente estudo, exceto para o solo LVAd-2, a aplicação de resíduo orgânico e calcário aumentou a produção de MSPA no florescimento. Esse resultado corrobora com o aumento dos valores de P-rem e ITP e redução da CMAP verificado nesses solos com a aplicação de resíduo orgânico e calcário (Capítulo 2).

Na Tabela 4, são apresentados os coeficientes de correlação linear entre produção de matéria seca da parte aérea no florescimento (MSPA-R6) e P-rem, CMAP, ITP e P-Mehlich-1. Observa-se que, no solo RQo, houve correlação significativa e positiva entre a produção de matéria seca no florescimento e o P-rem e negativa com a CMAP. No solo LVA-1, ocorreu correlação positiva com o P-rem, ITP e P-Mehlich1. Já no solo LVd, ocorreu correlação positiva com o P-rem e ITP e negativa com a CMAP. As alterações nos atributos ligados ao fator capacidade de P no solo, responsáveis pela maior ou menor absorção do nutriente pelas plantas, afetaram significativamente o desenvolvimento do feijoeiro.

TABELA 1. Análise de variância para o acúmulo de matéria seca na parte aérea do feijoeiro no estágio de florescimento (MSPA-R6) no solo LVAd-2.

FV	GL	QM	Valor de Prob.
MO	4	16,30	0,18248ns
CAL	3	37,99	0,01527 *
MO x CAL	12	7,12	0,74038ns
Erro	60	10,10	
Total	79	71,51	

CV = 9,73 % Contraste significativo: Doses de calcário 0,5 vs 2,0

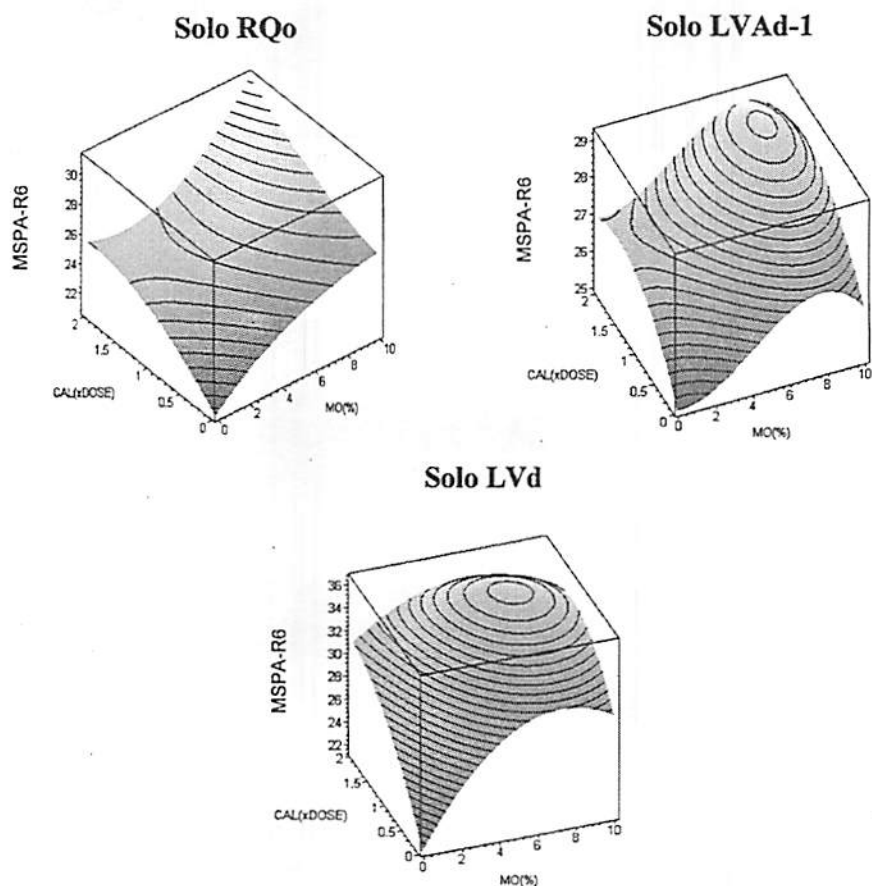


FIGURA 1. Representação gráfica do acúmulo de MSPA-R6 (g vaso⁻¹), em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (CAL), na forma de superfície de resposta, para os solos RQo, LVAd-1 e LVd.

FIGURA 2. Cortes horizontais sobre o espaço fatorial de resposta mostrando isocuantas correspondentes a várias faixas de produção de MSPA-R6 (g vaso⁻¹) em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (CAL).

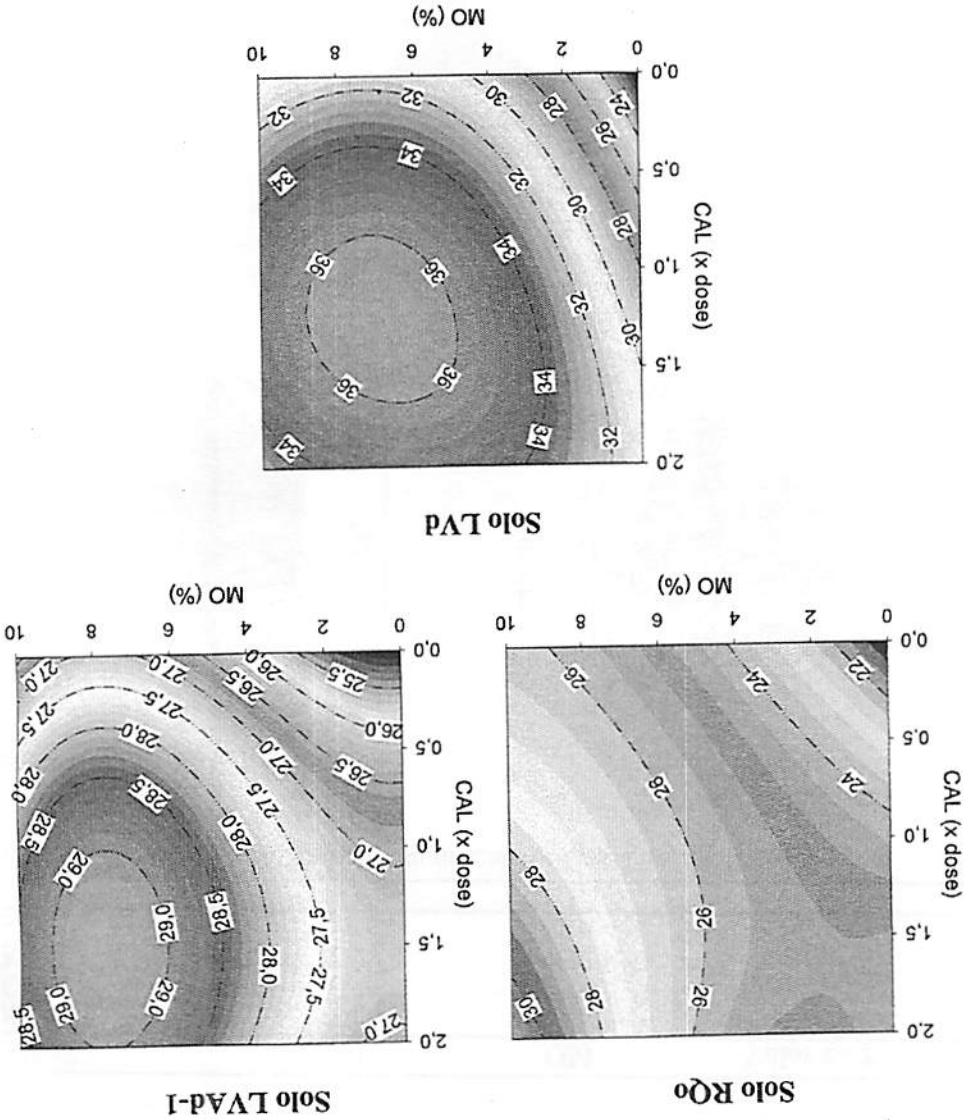


TABELA 2. Modelos ajustados para o acúmulo de MSPA-R6 (y) em função da aplicação de esterco bovino (MO) e calcário (CAL), para os solos RQo, LVAd-1, LVAd-2 e LVd.

Solo	Modelo ajustado
RQo	$y = \beta_0 + \beta_1 MO + \beta_2 CAL + \beta_3 (MO)^2 + \beta_4 (CAL)^2 + \beta_5 (MO * CAL) + \beta_6 (MO)^2 * CAL + \beta_7 (MO)^2 * (CAL)^2$
LVAd-1	$y = \beta_0 + \beta_1 CAL + \beta_2 MO + \beta_3 (MO)^2 + \beta_4 (CAL)^2 + \beta_5 (MO)^3$
LVAd-2	$y = \beta_0$
LVd	$y = \beta_0 + \beta_1 MO + \beta_2 CAL + \beta_3 (MO)^2 + \beta_4 (CAL)^2 + \beta_5 MO * (CAL)^2 + \beta_6 (MO)^2 * (CAL)^2$

TABELA 3. Estimativa dos parâmetros, significância e coeficientes de determinação (R²) dos modelos ajustados apresentados na Tabela 2, e valores máximos para o acúmulo de MSPA-R6 e quantidades ótimas de esterco bovino (MO) e calcário (CAL), em cada solo.

Parâmetro	SOLOS			
	RQo	LVAd-1	LVAd-2	LVd
β_0	20,72(0,27)***	24,99(0,24)***	32,65	21,45(0,42)***
β_1	0,95(0,11)***	2,89(0,43)***	-	2,76(0,18)***
β_2	4,82(0,53)***	-0,06(0,20) n.s.	-	8,33(0,67)***
β_3	-0,04(0,01)***	0,12(0,05)*	-	-0,19(0,02)***
β_4	-1,21(0,24)***	-0,96(0,19)***	-	-1,76(0,34)***
β_5	-0,69(0,09)***	-0,01(0,01)*	-	-0,37(0,08)***
β_6	0,03(0,01)*	-	-	0,02(0,01)*
β_7	0,02(0,01)***	-	-	-
R ²	88,63 %	77,95 %	-	91,10 %
Pto de Máx. (MO,CAL)	31,22 (g vaso ⁻¹) (10,00 ; 2,00)	29,25 (g vaso ⁻¹) (7,74 ; 1,5)	-	36,61 (g vaso ⁻¹) (6,89 ; 1,25)

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

TABELA 4. Coeficientes de correlação linear entre produção de matéria seca da parte aérea no florescimento (MSPA-R6) e P-rem, CMAP, ITP e P-Mehlich-1, para os diferentes solos.

	MSPA-R6			
	RQ	LVAd-1	LVAd-2	LVd
P-rem	0,87**	0,62*	-	0,85**
CMAP	-0,84**	ns	-	-0,78*
ITP	ns	0,90**	-	0,77*
P-Mehlich1.	ns	0,95**	-	ns

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

3.2 Teores de fósforo na parte aérea do feijoeiro no estágio de florescimento

A adição de matéria orgânica e calagem afetaram significativamente os teores de P na matéria seca da parte aérea do feijoeiro (MSPA-R6) em todos os solos. No solo RQo, observa-se que os teores de P aumentam à medida que se elevam as doses de esterco bovino até doses ao redor de 4 %, a partir da qual ocorreu uma redução (Figura 3). O mesmo ocorreu no solo LVAd-1, no qual os teores de P se elevaram com o aumento nos níveis de calcário até doses ao redor de 1,3, a partir da qual qualquer acréscimo na calagem promoveu redução nos teores de P. Nas doses mais elevadas de calcário, possivelmente ocorreu precipitação de micronutrientes catiônicos e/ou formação de compostos de baixa solubilidade de P-Ca, afetando a absorção de P e, conseqüentemente, o desenvolvimento das plantas. Ainda, na ausência de calcário, a presença do Al^{+3} prejudica a translocação do P para a parte aérea da planta (Lee, 1971).

Para o solo RQo, o ponto de máximo foi obtido em doses baixas de matéria orgânica (2,29 %) e alta para calcário (1,7). Nos solos LVAd-1 e LVAd-2, os teores mais altos foram obtidos em combinações de doses altas de

matéria orgânica (10,0 %) e intermediária de calcário (~1,3). No solo LVd, o maior teor foi obtido em doses altas de calcário (2,0) e intermediária a alta de matéria orgânica (6,94 %), conforme pode ser observado nas Figuras 3 e 4, cujos modelos ajustados se encontram na Tabela 5 e os pontos de máximos indicados na Tabela 6. Verificou-se, de modo geral, uma tendência de redução nos teores de P na MSPA-R6 nas doses mais elevadas de MO e calcário, possivelmente devida a um efeito de diluição ou, ainda, a uma menor absorção devida à formação de compostos de baixa solubilidade de P-Ca.

Observa-se que nos solos mais arenosos, menos intemperizados, com maiores valores de P-rem e ITP e menores CMAP, o teor de P nos tecidos vegetais foram maiores. Segundo Novais & Smyth (1999), a maior ou menor competição entre plantas e solo pelo P aplicado faz com que a planta se ajuste para utilizar o P que lhe é colocado à disposição. Dessa forma, quando o P é o único fator limitante à produção, além das variações decorrentes entre espécies ou cultivares, idade do tecido vegetal, forma do nutriente, interação entre nutrientes e condições ambientais, o ITP e CMAP devem ser considerados na interpretação dos teores de P nas plantas (Muniz et al., 1985). Andrade et al., (2002) verificaram correlação positiva entre teor foliar de P e P-rem e negativa entre o teor foliar e CMAP e ITP, para solos de várzea.

A capacidade máxima de adsorção e o P-rem são atributos que refletem o poder tampão ou fator capacidade de P no solo (Muniz et al., 1985). A variação do fator capacidade entre solos normalmente está associada à adsorção de P, à mineralogia, textura e matéria orgânica do solo (Bahia Filho et al., 1983 e Muniz et al., 1985). Vários autores observaram relação inversa entre o P absorvido pela planta e o fator capacidade do solo (Holford & Mattingly, 1976; Bahia filho et al., 1983; Muniz et al., 1983; Fabres et al., 1987 e Fernandes et al., 1998). Desse modo, para a interpretação dos resultados de teores de P nos

tecidos vegetais, deve-se considerar, também, o fator capacidade dos solos (ITP).

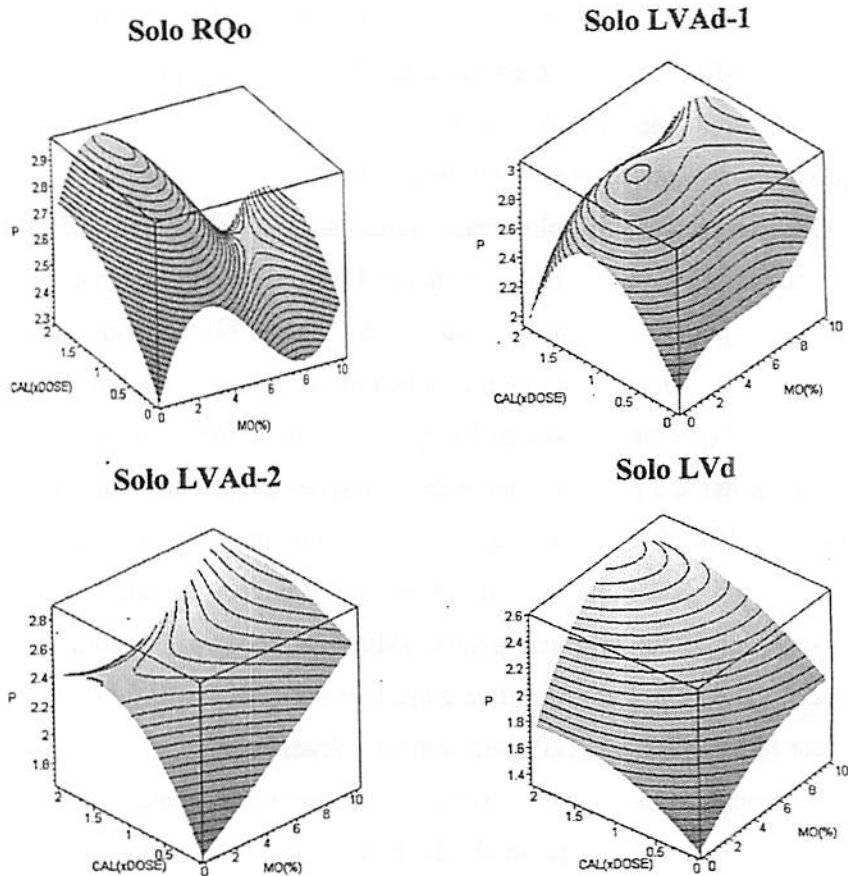


FIGURA 3. Representação gráfica do teor de P na MSPA-R6 ($g\ kg^{-1}$), em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (CAL), na forma de superfície de resposta, para os solos RQo, LVAd-1, LVAd-2 e LVd.

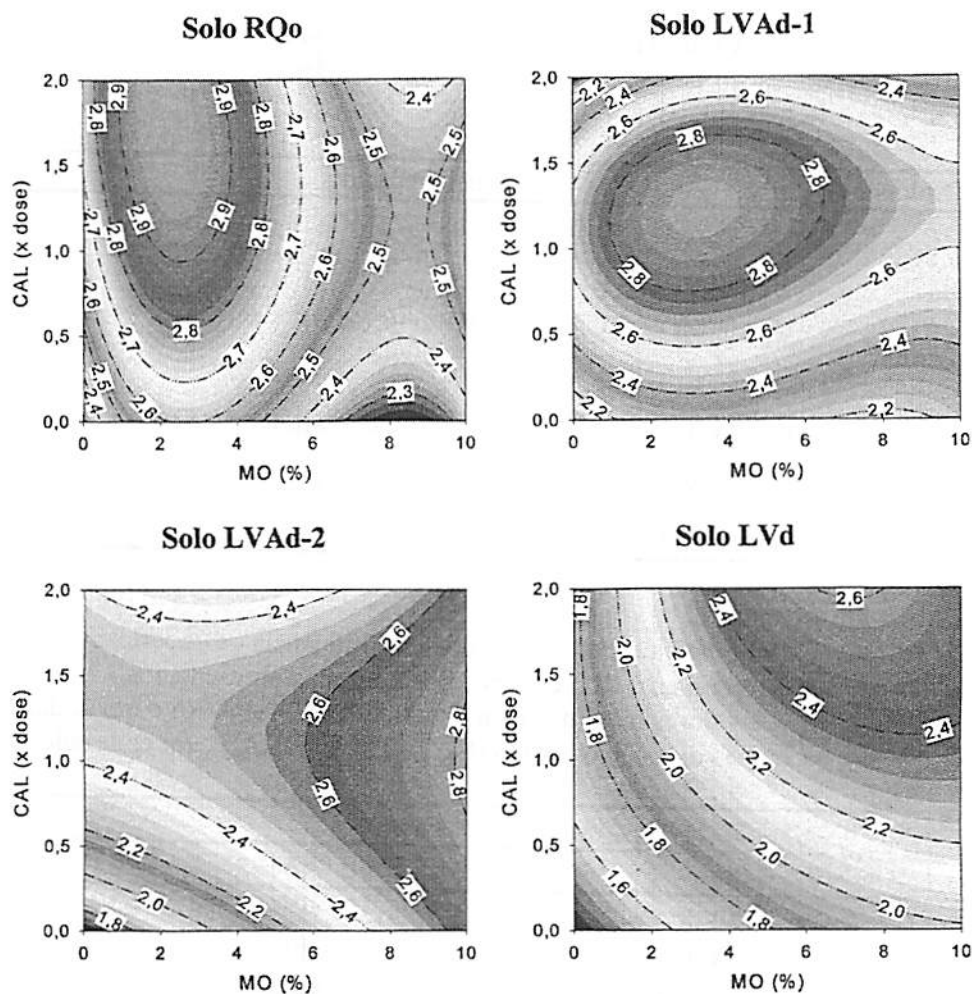


FIGURA 4. Cortes horizontais sobre o espaço fatorial da superfície de resposta mostrando isoquantas correspondentes a várias faixas de valores de teor de P na MSPA-R6 (g kg^{-1}), em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (CAL).

TABELA 5. Modelos ajustados para o teor de P na MSPA-R6 (y) em função da aplicação de esterco bovino (MO) e calcário (CAL), para os solos RQo, LVAd-1, LVAd-2, LVd.

Solo	Modelo ajustado
RQo	$y = \beta_0 + \beta_1 MO + \beta_2 CAL + \beta_3 (MO)^2 + \beta_4 (MO)^3 + \beta_5 (CAL)^2 + \beta_6 MO * (CAL)^2$
LVAd-1	$y = \beta_0 + \beta_1 MO + \beta_2 CAL + \beta_3 (MO)^2 + \beta_4 (MO)^3 + \beta_5 (CAL)^3 + \beta_6 CAL * (MO)^2 + \beta_7 MO * (CAL)^2$
LVAd-2	$y = \beta_0 + \beta_1 MO + \beta_2 CAL + \beta_3 CAL^2 + \beta_4 MO * CAL + \beta_5 (CAL)^2 * (MO)^2$
LVd	$y = \beta_0 + \beta_1 MO + \beta_2 CAL + \beta_3 (MO)^2 + \beta_4 (CAL)^2 + \beta_5 MO * (CAL)^2 + \beta_6 (MO)^2 * (CAL)^2$

TABELA 6. Estimativa dos parâmetros, significância e coeficientes de determinação (R^2) dos modelos ajustados apresentados na Tabela 5, e valores máximos para o teor de P na MSPA-R6 e quantidades ótimas de esterco bovino (MO) e calcário (CAL), em cada solo.

Parâmetro	SOLO			
	RQo	LVAd-1	LVAd-2	LVd
β_0	2,292(0,072)***	2,062(0,041)***	1,668(0,064)***	1,343(0,066)***
β_1	0,265(0,050)***	0,158(0,038)***	0,098(0,010)***	0,114(0,028)***
β_2	0,437(0,075)***	0,794(0,067)***	1,109(0,134)***	0,497(0,105)***
β_3	-0,066(0,011)***	-0,034(0,009)***	-0,368(0,056)***	-0,005(0,003)*
β_4	0,004(0,001)***	0,002(0,001)***	-0,077(0,018)***	-0,146(0,055)**
β_5	-0,107(0,042)*	-0,212(0,019)***	0,002(0,001)**	0,032(0,013)*
β_6	-0,009(0,004)*	-0,005(0,002)**		-0,003(0,001)*
β_7		0,028(0,008)***		
R^2	81,03 %	78,50 %	72,44 %	76,13 %
Pto Máx. (MO,CAL)	2,975 g kg ⁻¹ (2,29 ; 1,70)	2,936 g kg ⁻¹ (3,78; 1,24)	2,796 g kg ⁻¹ (10,00 ; 1,38)	2,614 g kg ⁻¹ (6,94 ; 2,00)

***, **, *: significativo a 0,1, 1,0 e 5 %, respectivamente.

Na Tabela 7, observa-se que para os solos LVAd-2 e LVd ocorreram correlações positivas entre o teor de P na MSPA-R6 e as variáveis P-rem, ITP e P-Mehlich-1 e negativa com a CMAP, indicando uma menor absorção do nutriente nas situações de maior fixação de P.

TABELA 7. Coeficientes de correlação linear entre teor de P na matéria seca da parte aérea no florescimento (MSPA-R6) e P-rem, CMAP, ITP e P-Mehlich-1.

	Teor de P na MSPA-R6			
	RQo	LVAd-1	LVAd-2	LVd
P-rem	ns	ns	0,75*	0,87**
CMAP	ns	ns	-0,80**	-0,75*
ITP	ns	ns	0,71*	0,68*
P-Mehlich1.	ns	ns	0,66*	0,64*

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

3.3 Produção de matéria seca da parte aérea do feijoeiro no estágio de maturação dos grãos

A adição de matéria orgânica e calagem afetaram significativamente o acúmulo de matéria seca da parte aérea no estágio de maturação dos grãos do feijoeiro (MSPA-R9) em todos os solos. Em geral, para todos os solos, ocorreram as maiores produções de MSPA-R9 nas combinações de doses altas de matéria orgânica e calcário. De acordo com os dados experimentais, para o solo RQo, as maiores respostas foram obtidas nas doses 7,39 % de matéria orgânica e 2,0 vezes a dose de calcário; para o solo LVA-1, nas doses 10,0 % de matéria orgânica e 1,61 vez a dose de calcário. Nos demais solos, as maiores respostas foram obtidas em doses máximas de matéria orgânica e calcário (Figuras 5 e 6 e Tabelas 8 e 9).

Na Figura 6, observam-se os cortes horizontais feitos sobre o espaço fatorial da superfície de resposta, obtendo-se várias curvas, nas quais todas as combinações das doses de matéria orgânica e calcário resultam na mesma produção de matéria seca.

Na Tabela 10 podem ser observados os coeficientes de correlação linear entre produção de matéria seca da parte aérea na maturação dos grãos (MSPA-R9) e P-rem, CMAP, ITP e P-Mehlich1. No solo RQo, houve correlações significativas e positivas entre a produção de MSPA-R9 e o P-rem e P-Mehlich1, e negativa com a CMAP. No solo LVAd-1, positivas com o ITP e P-Mehlich1. Nos solos LVAd-2 e LVd, ocorreram correlações positivas com o P-rem, ITP e P-Mehlich-1 e negativa com a CMAP. Isso mostra um maior desenvolvimento do feijoeiro devido à uma maior disponibilidade de P no solo.

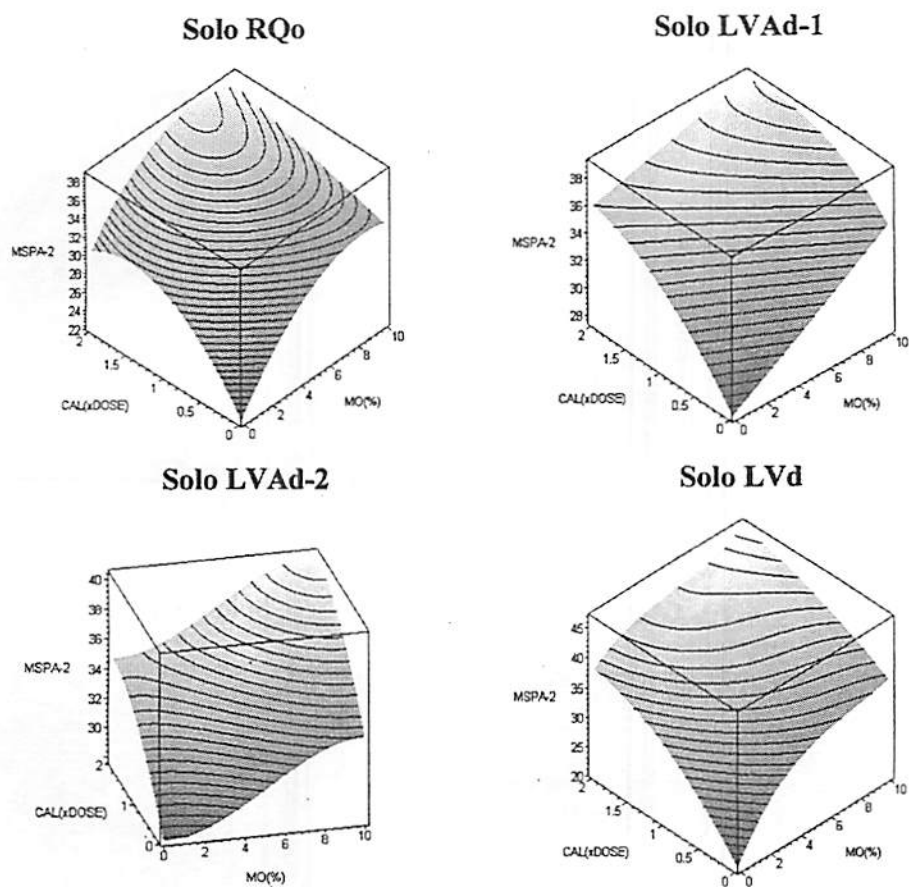


FIGURA 5. Representação gráfica para o acúmulo de MSPA-R9 (g vaso⁻¹), em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (CAL), na forma de superfície de resposta, para os solos RQo, LVAd-1, LVAd-2 e LVd.

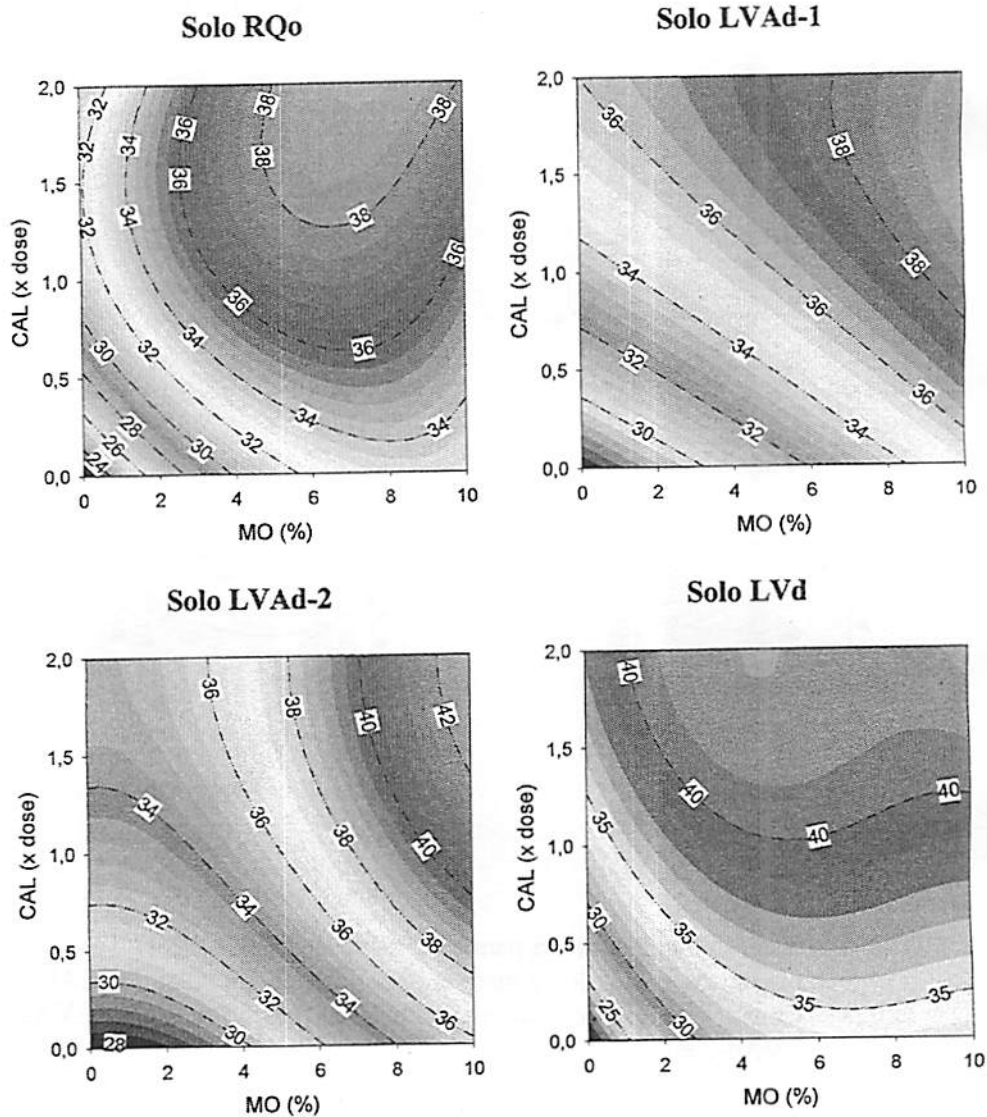


FIGURA 6. Corte horizontal sobre o espaço fatorial da superfície de resposta mostrando as isoquantas correspondentes a várias faixas de produções de MSPA-R9 (g vaso^{-1}), em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (CAL).

TABELA 8. Modelos ajustados para o acúmulo de MSPA-R9 (y) em função da aplicação de esterco bovino (MO) e calcário (CAL), para os solos RQ0, LVAd-1, LVAd-2, LVd.

Modelo ajustado	Solo
$y = \beta_0 + \beta_1 MO + \beta_2 CAL + \beta_3 (MO)^2 + \beta_4 (CAL)^2 + \beta_5 (MO * CAL) + \beta_6 MO * (CAL)^2$	RQ0
$y = \beta_0 + \beta_1 MO + \beta_2 CAL + \beta_3 (MO)^2 + \beta_4 (CAL)^2 + \beta_5 (MO)^3$	LVAd-1
$y = \beta_0 + \beta_1 MO + \beta_2 CAL + \beta_3 MO^2 + \beta_4 CAL^2 + \beta_5 MO^3$	LVAd-2
$y = \beta_0 + \beta_1 MO * CAL + \beta_2 (MO * CAL)^2 + \beta_3 (MO * CAL)^3$	LVd

TABELA 9. Estimativa dos parâmetros, significância e coeficientes de determinação (R²) dos modelos ajustados apresentados na Tabela 8, e valores máximos para o acúmulo de MSPA-R9 e quantidades ótimas de esterco bovino (MO) e calcário (CAL), em cada solo.

Parâmetro	RQ0	LVAd-1	LVAd-2	LVd
β_0	22,25(0,48)***	27,57(0,38)***	27,86(0,30)***	20,37(0,54)***
β_1	2,58(0,15)***	0,76(0,05)***	-0,11(0,25) ns	4,81(0,36)***
β_2	13,23(1,15)***	7,29(0,68)***	6,89(0,53)***	16,11(1,19)***
β_3	-0,15(0,01)***	-1,54(0,29)***	0,19(0,06)**	-0,55(0,08)***
β_4	-4,55(0,53)***	-0,23(0,05)***	-1,72(0,25)***	-3,62(0,54)***
β_5	-1,07(0,19)***	-	-0,01(0,01)**	0,02(0,00)***
β_6	0,45(0,09)***	-	-	-1,86(0,26)***
β_7	-	-	-	0,09(0,02)***
β_8	-	-	-	0,26(0,09)***
R ²	92,11 %	88,16 %	92,71 %	96,41 %
Pt. Max. (MO, CAL)	38,87g.vaso ⁻¹ (7,39; 2,00)	39,21g.vaso ⁻¹ (10,00; 1,61)	42,66g.vaso ⁻¹ (10,00; 2,00)	42,41g.vaso ⁻¹ (10,00; 2,00)

***, **, ns: significativo a 0,1, 1 % e não significativo, respectivamente.

TABELA 10. Coeficientes de correlação linear entre produção de matéria seca da parte aérea na maturação dos grãos (MSPA-R9) e P-rem, CMAP, ITP e P-Mehlich-1.

	MSPA-R6			
	RQo	LVAd-1	LVAd-2	LVd
P-rem	0,81**	ns	0,68*	0,70*
CMAP	-0,80**	ns	-0,61*	-0,56*
ITP	ns	0,84**	0,69*	0,70*
P-Mehlich1.	0,77*	0,93**	0,81**	0,80**

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

3.4 Produção de matéria seca de grãos

A adição de matéria orgânica e calagem afetaram significativamente a produção de grãos pelo feijoeiro (MSGR) em todos os solos. Em geral, em todos os solos, ocorreram as maiores produções de grãos (MSGR) com as doses altas de matéria orgânica. Destaca-se aqui uma particularidade para o solo RQo, que apresentou uma produção alta com as doses 9,76 % de MO e 1,0 vez a dose calcário e, também, produção expressiva com as doses 5,28 % MO e 2,0 vezes a dose calcário. O solo LVAd-1 apresentou maior produção de MSGR com dose alta de matéria orgânica (10,0) e baixa de calcário (0,24). Nos demais solos (LVAd-2 e LVd), as melhores produções de MSGR foram obtidas com doses altas de matéria orgânica e calcário. Esses resultados podem ser observados nas Figuras 7 e 8 e nas Tabelas 11 e 12.

Foram obtidos cortes horizontais sobre o espaço fatorial da superfície de resposta, determinando-se várias curvas, nas quais todas as combinações das doses de matéria orgânica e calcário resultaram na mesma produção de grãos (Figura 8).

O aumento na produção de grãos do feijoeiro pela aplicação de esterco bovino e de calcário se deve, provavelmente, à maior disponibilidade de P, em razão da redução na sua fixação mediante o bloqueio dos sítios de adsorção do nutriente no solo.

Faquin et al. (1998); Fernandes et al. (2002) e Andrade et al. (2002), em solos de várzea, verificaram que o feijoeiro é responsivo à aplicação de calcário, sendo esse corretivo essencial para fornecer Ca, Mg, elevar o pH e neutralizar a toxidez por Al e Mn.

Na Tabela 13 podem ser observadas as correlações entre a produção de MSGR e P-rem, CMAP, ITP e P-Mehlich1. No solo RQo, observaram-se correlações significativas positivas entre a produção de grãos e o P-rem e P-Mehlich1 e negativas com a CMAP. Nos solos LVAd-1 e LVAd-2, correlações positivas com o P-rem, ITP e P-Mehlich1. O solo LVd apresentou correlações positivas com o P-rem, ITP e P-Mehlich1 e negativas com a CMAP. Pela Tabela 14, verificam-se coeficientes de correlação significativos e positivos entre a produção de grãos e os componentes produtivos do feijoeiro. Verificou-se que a produção de grãos pelo feijoeiro foi diretamente proporcional ao ITP, que representa a capacidade do solo em repor o P em solução, semelhante ao verificado para os teores de P no tecido vegetal na época do florescimento. Considerando que o grão é a parte comercial do feijoeiro, a aplicação de resíduos orgânicos e calcário pode maximizar a produção pela maior disponibilização do P aplicado.

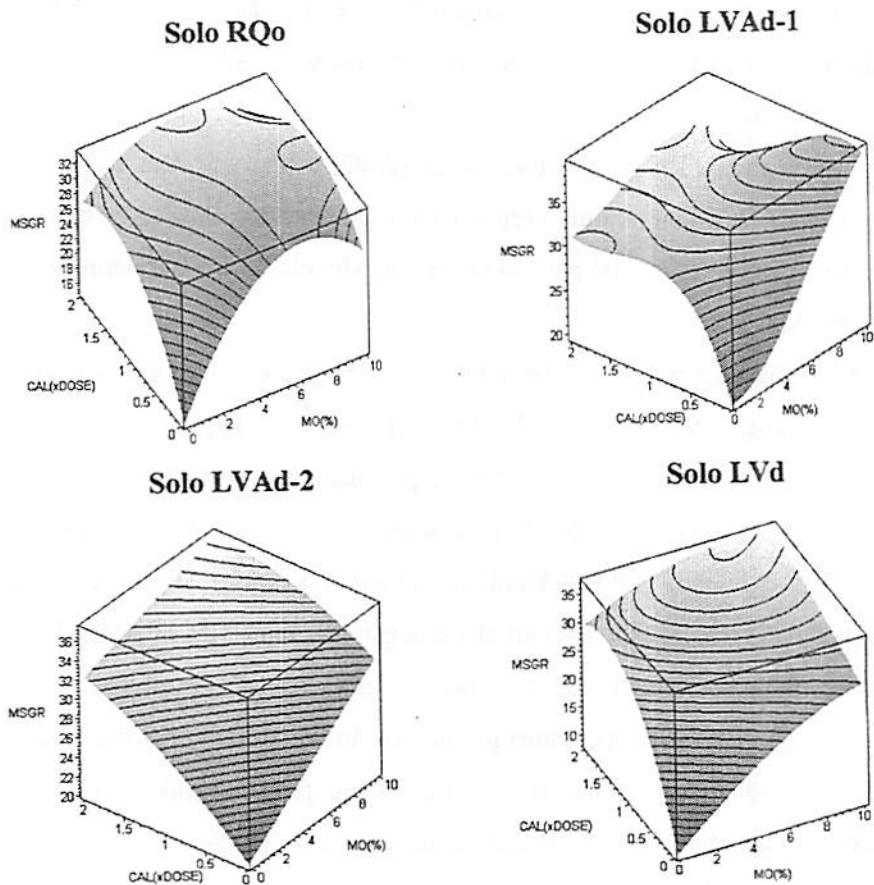


FIGURA 7. Representação gráfica para a produção MSGR (g vaso^{-1}), em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (CAL), na forma de superfície de resposta, para os solos RQo, LVAd-1, LVAd-2 e LVd.

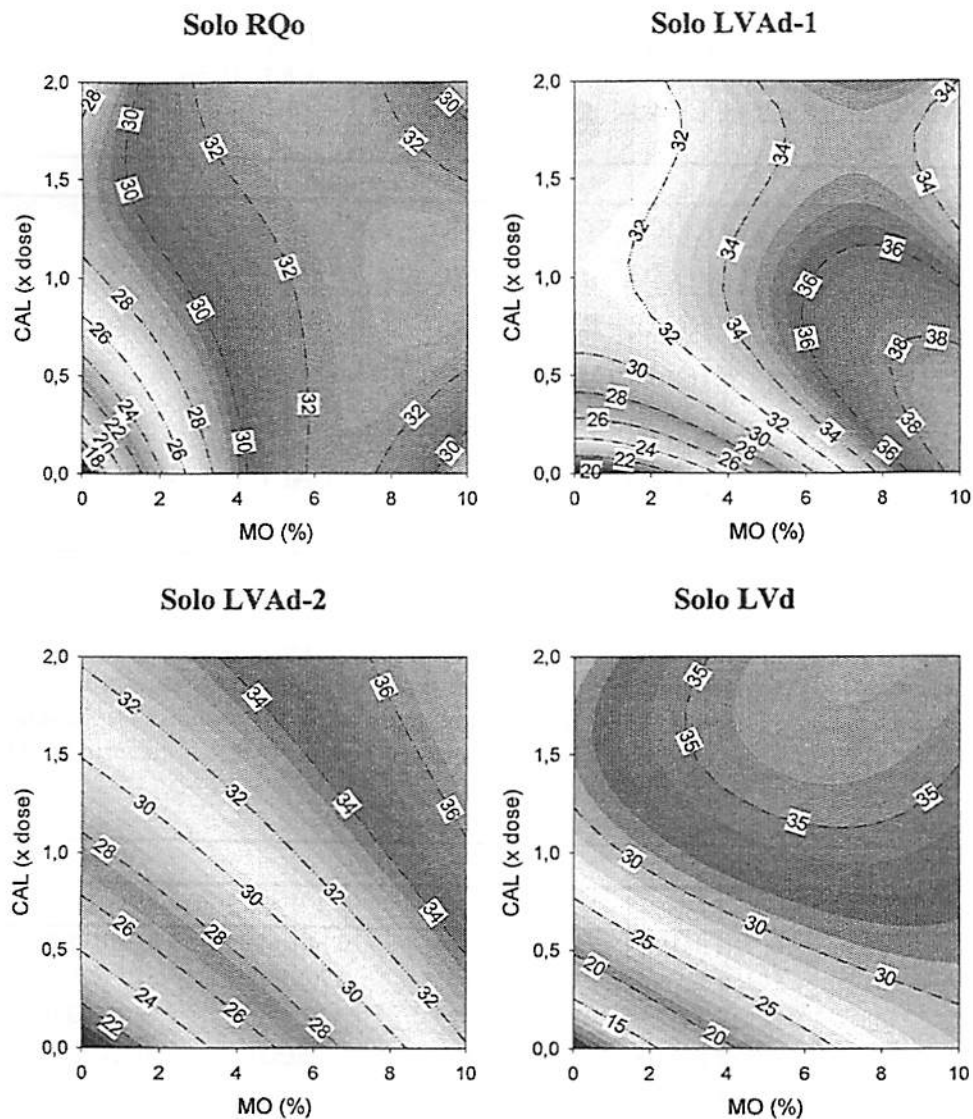


FIGURA 8. Cortes horizontais sobre o espaço fatorial da superfície de resposta mostrando as isoquantas correspondentes a várias faixas de produções de MSGR (g vase^{-1}), em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (CAL).

TABELA 11. Modelos ajustados para a produção de grãos (Y) em função da aplicação de esterco bovino (MO) e calcário (CAL), para os solos RQ, LVAD-1, LVAD-2, LVA.

Solo	Modelo ajustado
RQ	$y = \beta_0 + \beta_1 MO + \beta_2 CAL + \beta_3 (MO)^2 + \beta_4 (CAL)^2 + \beta_5 (MO * CAL) + \beta_6 (MO)^2 (CAL)^2 + \beta_7 (MO)^2 (MO)^2 + \beta_8 (MO)^2 (CAL)^2$
LVAD-1	$y = \beta_0 + \beta_1 CAL + \beta_2 (MO)^2 + \beta_3 (CAL)^2 + \beta_4 (MO)^3 + \beta_5 (CAL)^3 + \beta_6 (CAL) * (MO)^2 + \beta_7 (CAL)^2 * (MO)^2$
LVAD-2	$y = \beta_0 + \beta_1 MO + \beta_2 CAL + \beta_3 CAL^2 + \beta_4 MO * CAL$
LVA	$y = \beta_0 + \beta_1 MO + \beta_2 CAL + \beta_3 (MO)^2 + \beta_4 (CAL)^2 + \beta_5 (MO * CAL) + \beta_6 (CAL)^2 * MO$

TABELA 12: Estimativa dos parâmetros, significância e coeficientes de determinação (R²) dos modelos ajustados apresentados na Tabela 11, e valores máximos para a produção de MSGR e quantidades ótimas de esterco bovino (MO) e calcário (CAL), em cada solo.

Parâmetro	RQ	LVAD-1	LVAD-2	LVA
β_0	14,92(1,33)***	19,73(1,08)***	20,14(0,67)***	8,38(0,98)***
β_1	5,21(0,63)***	27,72(5,15)***	1,17(0,10)***	3,25(0,30)***
β_2	19,02(3,37)***	0,39(0,06)***	8,47(1,19)***	28,47(2,33)***
β_3	-0,39(0,06)***	-20,71(7,33)***	-1,22(0,52)*	-0,12(0,03)***
β_4	-6,50(1,56)***	-0,02(0,01)***	-0,33(0,09)***	-8,85(1,08)***
β_5	-6,69(1,59)***	4,83(2,53)***	-	-2,33(0,38)***
β_6	0,58(0,15)***	-0,22(0,05)***	-	0,82(0,18)***
β_7	2,65(0,74)***	0,07(0,02)***	-	-
β_8	-0,25(0,07)***	-	-	-
R ²	71,57%	71,39%	84,14%	90,34%
Pl. Max. (MO, CAL)	33,38 g VASO ⁻¹ (5,28; 2,0)	39,38 g VASO ⁻¹ (10,0; 0,24)	37,30 g VASO ⁻¹ (10,0; 2,0)	37,21 g VASO ⁻¹ (7,79; 2,0)

***, **, * significativo a 0,1, 1 e 5%, respectivamente.

TABELA 13. Coeficientes de correlação linear entre produção de matéria seca de grãos (MSGR) e P-rem, CMAP, ITP e P-Mehlich1.

	MSGR			
	RQo	LVAd-1	LVAd-2	LVd
P-rem	0,86**	0,71*	0,65*	0,78*
CMAP	-0,85**	ns	ns	-0,64*
ITP	ns	0,79*	0,64*	0,73*
P-Mehlich1.	0,78*	0,70*	0,74*	0,72*

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

TABELA 14. Coeficientes de correlação linear entre produção de matéria seca de grãos (MSGR) e os componentes produtivos MSPA-R6, teor de P na MSPA-R6, MSPA-R9

	MSGR			
	RQo	LVAd-1	LVAd-2	LVd
MSPA-R6	0,73*	0,78*	ns	0,88**
Teor de P	ns	ns	0,83*	0,90**
MSPA-R9	0,88**	0,76*	0,97**	0,97**

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

3.5 Acúmulo de fósforo na matéria seca da parte aérea total do feijoeiro

Para os quatro solos, o maior acúmulo de P na matéria seca da parte aérea total do feijoeiro (MSPA-R9 + MSGR) ocorreu com doses altas de matéria orgânica. Para o solo LVd, isso também foi verificado com as doses altas de calcário. Para os solos RQo e LVAd-1, maior acúmulo de P ocorreu em combinações de doses altas de matéria orgânica (10,0 %) e 0,48 e 0,99 vez a dose de calcário, respectivamente, conforme Figuras 9 e 10 e Tabelas 15 e 16. No solo LVd, verifica que o acúmulo de P aumenta linearmente com a elevação simultânea dos níveis de MO e CAL. No solo LVAd-2, também se verifica um comportamento similar ao LVd para o acúmulo de P; porém, esse o aumento é mais expressivo quando se aumentam os níveis de MO.

Na Tabela 17, verificam-se os coeficientes de correlação linear entre quantidade acumulada de P na matéria seca total da parte aérea na maturação dos grãos (MSPA-R9 + MSGR) e P-rem, CMAP, ITP e P-Mehlich-1. No solo RQo, ocorreram correlações positivas com o P-rem e P-Mehlich-1 e negativas com a CMAP. O solo LVAd-1 apresentou correlações positivas com P-rem, ITP e P-Mehlich1. Ocorreram correlações positivas com o P-rem, ITP e P-Mehlich1 e negativas com a CMAP no solo LVAd-2. Já no solo LVd, as correlações foram positivas entre a quantidade de P acumulado e o P-rem e ITP e negativa com a CMAP.

Apesar de o feijoeiro cultivado nos solos mais arenosos, menos intemperizados, com maiores valores de P-rem e ITP e menores CMAP ter apresentado os maiores teores de P nos tecidos vegetais, o seu maior acúmulo foi observado nas plantas cultivadas nos solos mais argilosos. Isso ocorreu devido à maior capacidade de armazenamento de P dos solos argilosos (Novais & Smyth, 1999). Segundo esse mesmo autor, a maior ou menor competição entre plantas e

solo pelo P aplicado faz com que a planta se ajuste para utilizar o P que lhe é colocado à disposição. A capacidade máxima de adsorção e o P-rem são atributos que refletem o poder tampão ou fator capacidade de P no solo (Muniz et al., 1985). E a variação na adsorção de P entre os solos normalmente está associada à mineralogia, textura e matéria orgânica do solo (Bahia Filho et al., 1983 e Muniz et al., 1985). Vários autores observaram relação inversa entre o P absorvido pela planta e o fator capacidade do solo (Holford & Mattingly, 1976; Bahia filho et al., 1983; Muniz et al., 1983; Fabres et al., 1987 e Fernandes et al., 1998). Porém, o maior conteúdo da fração de P pouco lábil apresentado pelos solos mais argilosos (Capítulo 3) supriu o P em solução, concorrendo para maior absorção do nutriente e maior desenvolvimento vegetal e, conseqüentemente, maior acúmulo do nutriente pelas plantas.

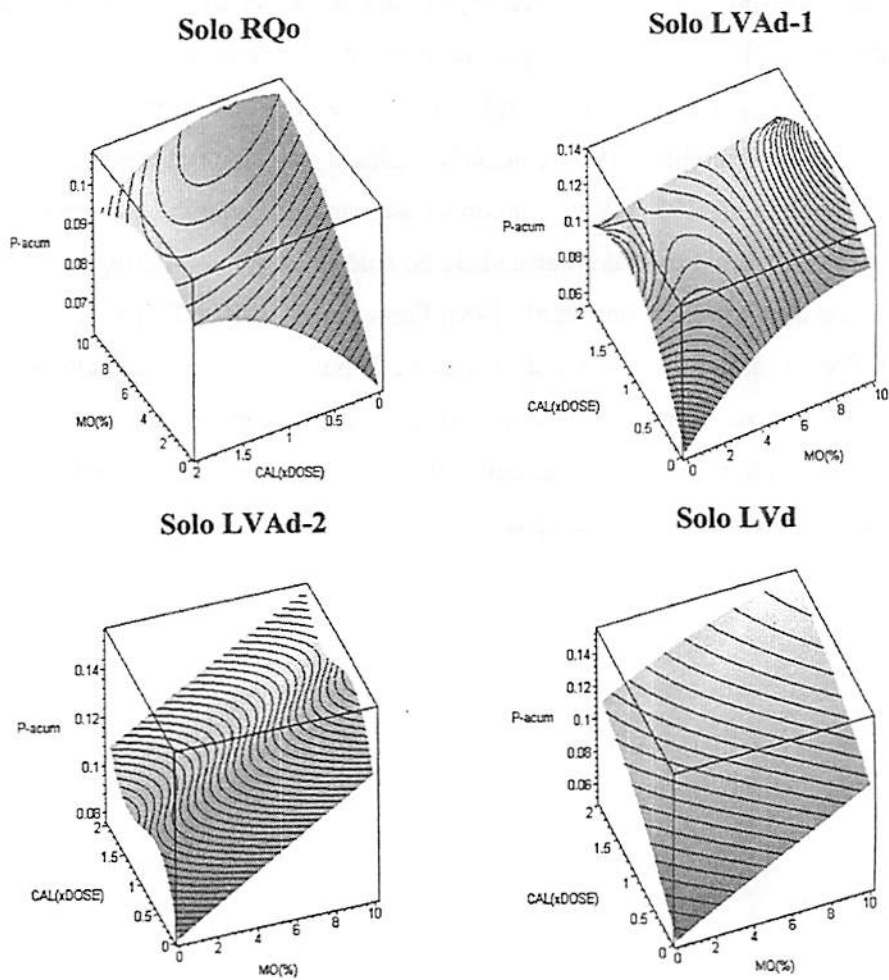


FIGURA 9. Representação gráfica do acúmulo de P na MSPA-R9 + MSGR (g vaso^{-1}), em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (CAL), na forma de superfície de resposta, para os solos RQo, LVAd-1, LVAd-2 e LVd.

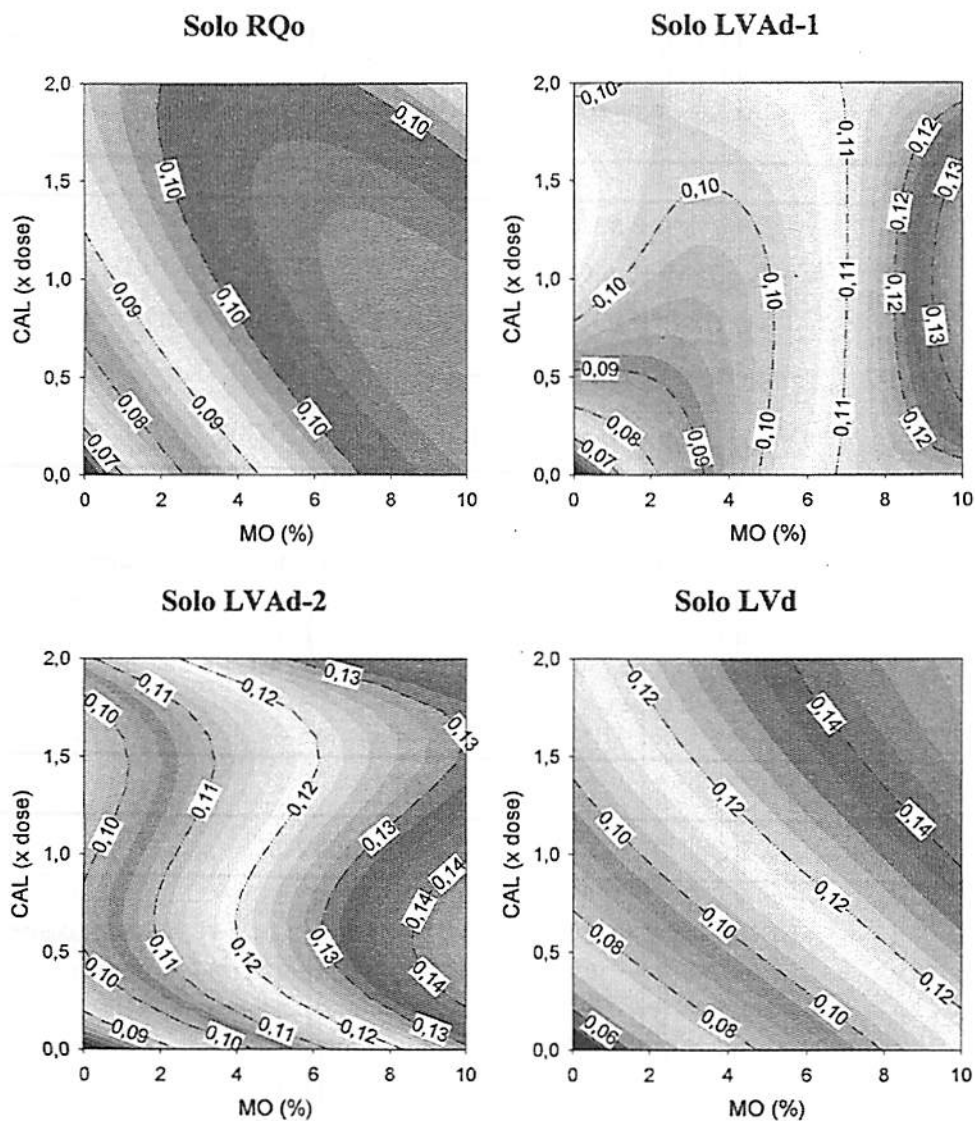


FIGURA 10. Cortes horizontais sobre o espaço fatorial da superfície de resposta mostrando as isoquantas correspondentes a várias faixas de acúmulo de P na MSPA-R9 + MSGR (g vaso^{-1}), em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (CAL).

***, **, * significativo a 0,1, 1 e 5 %, respectivamente.

Parametro	RQ0	LVAd-1	LVAd-2	LVD
β_0	0,0630(0,003)***	0,0565(0,0023)***	0,0774(0,0037)***	0,0507(0,0040)***
β_1	0,0073(0,001)***	0,0120(0,0014)***	0,0051(0,0005)***	0,0062(0,0006)***
β_2	0,0306(0,005)***	0,0780(0,0065)***	0,0826(0,0172)***	0,0469(0,0072)***
β_3	-0,0003(0,001)**	-0,0006(0,0001)***	-0,0897(0,0259)***	-0,0082(0,0032)*
β_4	-0,0071(0,002)**	-0,0287(0,0035)***	0,0281(0,0089)**	-0,0001(0,0001)*
β_5	-0,0023(0,001)***	-0,0303(0,0037)***	-0,0001(0,0004)**	
β_6		0,0027(0,0004)***		
β_7		0,0126(0,0018)***		
β_8		-0,0012(0,0002)***		
R ²	70,91 %	88,43 %	69,24 %	82,33 %
Pt Max (MO,CAL)	0,108 g VASO ⁻¹ (10,0; 0,48)	0,139 g VASO ⁻¹ (10,0; 0,99)	0,146 g VASO ⁻¹ (10,0; 0,50)	0,154 g VASO ⁻¹ (10,0; 2,0)

TABELA 16. Estimativa dos parâmetros, significância e coeficientes de determinação (R²) dos modelos ajustados apresentados na Tabela 15, e valores máximos para o P-accumulado e quantidades ótimas de esterco bovino (MO) e calcário (CAL), em cada solo.

Solo	Modelo ajustado
RQ0	$y = \beta_0 + \beta_1 MO + \beta_2 CAL + \beta_3 (MO)^2 + \beta_4 (CAL)^2 + \beta_5 (MO * CAL)$
LVAd-1	$y = \beta_0 + \beta_1 MO + \beta_2 CAL + \beta_3 (MO)^2 + \beta_4 (CAL)^2 + \beta_5 MO * CAL + \beta_6 CAL^2 + \beta_7 MO^2 + \beta_8 (MO * CAL)^2$
LVAd-2	$y = \beta_0 + \beta_1 MO + \beta_2 CAL + \beta_3 CAL^2 + \beta_4 CAL * MO$
LVD	$y = \beta_0 + \beta_1 MO + \beta_2 CAL + \beta_3 (CAL)^2 + \beta_4 CAL * (MO)^2$

TABELA 15. Modelos ajustados para o acúmulo de P na MSPA-R9 + MSGR (Y) em função da aplicação de esterco bovino (MO) e calcário (CAL), para os solos RQ0, LVAd-1, LVAd-2, LVD.

TABELA 17. Coeficientes de correlação linear entre quantidade acumulada de P na matéria seca total da parte aérea na maturação dos grãos (MSPA-R9 + MSGR) e P-rem, CMAP, ITP e P-Mehlich1.

	Acúmulo de P na MSPA-R9 + MSGR			
	RQ	LVAd-1	LVAd-2	LVd
P-rem	0,91**	0,69*	0,87**	0,89**
CMAP	-0,86**	ns	-0,84**	-0,76*
ITP	ns	0,71*	0,78*	0,75*
P-Mehlich1.	0,72*	0,73*	0,70*	ns

** , * e ns: significativo a 1, 5% e não significativo, respectivamente pelo teste t.

4 CONCLUSÕES

A adição de esterco bovino e calcário afetou positivamente a absorção e o acúmulo de fósforo pelo feijoeiro e, conseqüentemente, incrementou a produção de matéria seca da parte aérea e a produção de grãos pela cultura, devido a alterações nos atributos ligados ao fator capacidade de P no solo e sua maior disponibilidade à absorção vegetal.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVAREZ V., V. H. **Avaliação da Fertilidade do Solo** (Superfícies de resposta – Modelos aproximativos para expressar a relação fator-resposta). Viçosa: UFV. Imprensa Universitária, 1994. 75 p.
- ALVAREZ V., V. H.; FONSECA, D. M. Definição de doses de fósforo para determinação da capacidade máxima de adsorção de fosfatos e para ensaios de casa de vegetação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas v. 14, n. 1, p. 48-55, jan./abr. 1990.
- ANDRADE, A. T.; FERNANDES, L. A.; FAQUIN, V. Organic residue, limestone gypsum and phosphorus adsorption by lowland soils. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 59, n. 2, p. 349-355, abr./jun. 2002.
- BAHIA FILHO, A. F. C.; BRAGA, J. M.; RESENDE, M.; RIBEIRO, A. C. Relação entre adsorção de fósforo e componentes mineralógicos da fração argila de latossolos do Planalto central. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 7, n. 3, p. 221-226, set./dez. 1983.
- BRAGA, J. M.; DEFELIPO, B. V. Determinação espectrofotométrica de fósforo em extratos de solo e material vegetal. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 21, n. 113, p. 73-85, jan./fev. 1974.
- FABRES, A. S.; NOVAIS, R. F.; NEVES, J. C. L.; BARROS, N. F.; CORDEIRO, A. T. Níveis críticos de diferentes frações de fósforo em plantas de alface cultivado em diferentes solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 11, n. 1, p. 51-57, jan./abr. 1987.
- FAGERIA, N. K.; SANTOS, A. B. Adubação fosfatada para o feijoeiro em solo de várzea. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 2, n. 2, p. 124-127, maio/ago. 1998.
- FAQUIN, V.; ANDRADE, C. A. B.; FURTINE NETO, A. E.; ANDRADE, A. T.; CURL, N. resposta do feijoeiro à aplicação de calcário em solos de várzea do sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 4, p. 651-660, out./dez. 1998.

- FERNANDES, L. A.; FURTINE NETO, A. E.; CURL, N.; GUEDES, G. A. A.; LIMA, J. M. Fósforo e atividade da fosfatase ácida em plantas de feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 5, p. 769-778, maio 1998.
- FERNANDES, L. A.; FAQUIN, V.; FURTINI, A. E.; CURL, N. Formas de fósforo em solos de várzea e biodisponibilidade para o feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 3, p. 373-383, mar. 2002.
- FREIRE, J. C.; RIBEIRO, M. A. V.; BAHIA, V. G.; LOPES, A. S.; AQUINO, L. H. Resposta do milho cultivado em casa de vegetação a níveis de água em solos da região de Lavras (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 4, n. 1, p. 5-8, jan./abr. 1980.
- HOLFORD, I. C. R.; MATTINGLY, G. E. G. Phosphate adsorption and availability plant of phosphate. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 44, p. 377-389, 1976.
- KHURI, A. I.; CORNELL, J. A. **Response surfaces designs and analyses**. 2 ed. New York, 1996. v. 152, 510 p.
- LEE, C. R. Influence of aluminum on plant growth and mineral nutrition of potatoes. **Agronomy Journal**, Madison, v. 63, n. 4, p. 604-608, July/Aug. 1971.
- MARSCNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2. ed. London: Academic Press Limited, 1995. 889 p.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. de. **Avaliação do estado nutricional das plantas – princípios e aplicações**. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 210 p.
- McBRIDE, M. B. **Environmental chemistry of soils**. New York: Oxford University Press, 1994. 406 p.
- MEURER, E. J.; RHENHEIMER, D.; BISSANI, C. A. Fenômeno de sorção em solos. In: MEURER, J. E. (Ed.). **Fundamentos de química do solo**. 2. ed. Porto Alegre: Gênese, 2004. p. 131-179.
- MUNIZ, A. S.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; NEVES, J. C. L. Nível crítico de fósforo na parte aérea da soja como variável do fator capacidade de fósforo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 9, n. 3, p. 237-244, set./dez. 1985.

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

OLIVEIRA, I. P.; THUNG, M. D. T.; KLUTHCOUSKI, J.; AIDAR, H.; CARVALHO, J. R. P. Avaliação de cultivares de feijão quanto à eficiência no uso de fósforo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 22, n. 1, p. 39-45, jan. 1987.

PARRA, M. S.; MIRANDA, G. M. Uso de fertilizantes na cultura do feijoeiro. In: INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANA, Londrina. **Uso de fertilizantes na agricultura**. Londrina: IAPAR, 1980. p. 55-60. (IAPAR, Circular, 16).

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical computing, Vienna, Austria. 2004. Disponível em: <<http://www.R-project.org>>. Acesso em: 25 dez. 2004.

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