

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

ALEX TEIXEIRA ANDRADE

2005

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

ALEX TEIXEIRA ANDRADE

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

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**

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

Andrade, Alex Teixeira

Dinâmica do fósforo em solos de várzea cultivados com feijoeiro sob
influência da calagem e adubação orgânica / Alex Teixeira Andrade. -- Lavras :
UFLA, 2005.

117p. : 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 7. Feijão I.
Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD- 631.86

ALEX TEIXEIRA ANDRADE

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

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 7 de julho de 2005

Pesq. Dr. Francisco Dias Nogueira

CTSM/EPAMIG

Profa. Dra. Janice Guedes Carvalho

DCS/UFLA

Prof. PhD. Luiz Roberto Guimarães Guilherme

DCS/UFLA

Prof. Dr. Luiz Arnaldo Fernandes

NCA/UFMG

Prof. Dr. Valdemar Faquin
UFLA
(Orientador)

LAVRAS
MINAS GERAIS – BRASIL

Ao meu pai, Guiomar (*in memoriam*) e à minha mãe, Irene: “o início de tudo”.

DEDICO

À minha querida Áurea pelo amor e cumplicidade.
À minha família pelo carinho e incentivo.

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

“A felicidade aparece para aqueles que choram. Para aqueles que se machucam. Para aqueles que buscam e tentam sempre. E para aqueles que reconhecem a importância das pessoas que passam por sua vida”.

Clarice Lispector

A Deus pelo presente da vida e pela presença em minha vida.

Ao professor Valdemar Faquin pela orientação e pela oportunidade de crescimento profissional. Em especial pela compreensão nesta fase final do doutorado.

Ao professor Luiz Arnaldo Fernandes pela co-orientação e apoio constante.

Ao pesquisador Francisco Dias Nogueira e aos professores Janice Guedes Carvalho, Luiz Roberto Guimarães Guilherme e Luiz Arnaldo Fernandes pelas sugestões e contribuições no aprimoramento da tese.

Aos professores e funcionários da UFLA, especialmente àqueles que compõem o Departamento de Ciência do Solo pelo auxílio e apoio na realização deste trabalho.

À Universidade Federal de Lavras e ao Departamento de Ciência do Solo pelo suporte e estrutura.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudos.

Ao colega de doutorado Renato Ferreira de Souza pela colaboração ímpar.

Aos alunos de graduação Fabrício, Daniele e Rodrigo pela contribuição na condução dos trabalhos de campo.

Aos meus familiares – mãe, irmãos e irmãs, cunhados e cunhadas, sobrinhos e sobrinha, tios e tias – que são porto seguro em minha vida: *obrigado por tudo*.

Aos familiares de minha esposa que torceram e rezaram por mim. Especialmente à Dona Hilda – minha sogra querida, Andréa, Nelzy e Rogério.

A todos aqueles que incentivaram e apoiaram esta conquista.

SUMÁRIO

	Pág.
LISTA DE TABELAS	i
LISTA DE FIGURAS	vi
RESUMO GERAL	x
GENERAL ABSTRACT	xi
CAPÍTULO I	1
1 Introdução geral	2
2 Referencial teórico	4
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	12
CAPÍTULO II – Calagem e esterco bovino na nutrição fosfatada e produção do feijoeiro em solos de várzea	18
RESUMO	19
ABSTRACT	20
1 Introdução	21
2 Material e Métodos	22
3 Resultados e Discussão	27
4 Conclusões	48
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49
CAPÍTULO III – Calagem e esterco bovino na adsorção de P em solos de várzea	52
RESUMO	53
ABSTRACT	54
1 Introdução	55
2 Material e métodos	56
3 Resultados e discussão	59
4 Conclusões	78
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79

CAPÍTULO IV – Calagem e esterco bovino nas formas de fósforo em solos de várzea	83
RESUMO	84
ABSTRACT	85
1 Introdução	86
2 Material e métodos	88
3 Resultados e discussão	91
4 Conclusões	106
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107
ANEXOS	109

LISTA DE TABELAS

	CAPÍTULO II	Pág.
TABELA 1	Atributos químicos, físicos e mineralógicos dos solos antes da aplicação dos tratamentos.....	23
TABELA 2	Teores totais de nutrientes no resíduo (esterco de curral)....	24
TABELA 3	Modelos ajustados para o MSGR (y) em função da aplicação de esterco bovino (MO) e calcário (Cal), para os solos OY, GM, GX e RU.....	30
TABELA 4	Estimativa dos parâmetros, significância e coeficientes de determinação (R^2) dos modelos ajustados apresentados na Tabela 3, e valores máximos para o MSGR e quantidades ótimas de esterco bovino (MO) e calcário (Cal), em cada solo.....	30
TABELA 5	Modelos ajustados para o P Mehlich-1 (y), em função da aplicação de esterco bovino (MO) e calcário (Cal), para os solos OY, GM, GX e RU.....	34
TABELA 6	Estimativa dos parâmetros, significância e coeficientes de determinação (R^2) dos modelos ajustados apresentados na Tabela 5, e valores máximos para o P Mehlich-1 e quantidades ótimas de esterco bovino (MO) e calcário (Cal), em cada solo.....	34
TABELA 7	Modelos ajustados para o P florescimento (y), em função da aplicação de esterco bovino (MO) e calcário (Cal), para os solos OY, GM, GX e RU.....	38
TABELA 8	Estimativa dos parâmetros, significância e coeficientes de determinação (R^2) dos modelos ajustados apresentados na Tabela 7, e valores máximos para o P Florescimento e quantidades ótimas de esterco bovino (MO) e calcário (Cal), em cada solo.....	38
TABELA 9	Modelos ajustados para o MSPA (y) em função da aplicação de esterco bovino (MO) e calcário (Cal), para os solos OY, GM, GX e RU.....	41

TABELA 10	Estimativa dos parâmetros, significância e coeficientes de determinação (R^2) dos modelos ajustados apresentados na Tabela 9, e valores máximos para o MSPA e quantidades ótimas de esterco bovino (MO) e calcário (Cal), em cada solo.....	41
TABELA 11	Modelos ajustados para o acúmulo P (y), em função da aplicação de esterco bovino (MO) e calcário (Cal), para os solos OY, GM, GX e RU.....	44
TABELA 12	Estimativa dos parâmetros, significância e coeficientes de determinação (R^2) dos modelos ajustados apresentados na Tabela 11, e valores máximos para o acúmulo P e quantidades ótimas de esterco bovino (MO) e calcário (Cal), em cada solo.....	44
TABELA 13	Valores de P Mehlich-1, MSPA, P florescimento e P acumulado em relação à máxima produtividade.....	45
TABELA 14	Coeficientes de correlação linear simples entre a produção (MSGR) e P acumulado (Pacum) com alguns atributos dos solos.....	46
TABELA 15	Coeficientes de correlação linear simples entre os valores de P Mehlich-1, matéria seca da parte aérea (MSPA), P foliar no florescimento (P flor), matéria seca de grãos (MSGR) e P acumulado na parte aérea (P acum), no tratamento testemunha e os correspondentes à produção máxima nos quatro solos	47

CAPÍTULO III

TABELA 1	Modelos ajustados para o P-rem (y) em função da aplicação de esterco bovino (MO) e calcário (Cal), para os solos OY, GM, GX e RU.....	62
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-rem e doses ótimas de esterco bovino (MO) e calcário (Cal), em cada solo.....	62

TABELA 3	Modelos ajustados para o Al (y) em função da aplicação de esterco bovino (MO) e calcário (Cal), para os solos OY, GM, GX e RU.....	64
TABELA 4	Estimativa dos parâmetros, significância e coeficientes de determinação (R^2) dos modelos ajustados apresentados na Tabela 3, e valores máximos para o Al e quantidades ótimas de esterco bovino (MO) e calcário (Cal), em cada solo.....	64
TABELA 5	Modelos ajustados para o pH (y) em função da aplicação de esterco bovino (MO) e calcário (Cal), para os solos OY, GM, GX e RU.....	65
TABELA 6	Estimativa dos parâmetros, significância e coeficientes de determinação (R^2) dos modelos ajustados apresentados na Tabela 5, e valores máximos para o pH e quantidades ótimas de esterco bovino (MO) e calcário (Cal), em cada solo.....	65
TABELA 7	Modelos ajustados para o CMAP (y) em função da aplicação de esterco bovino (MO) e calcário (Cal), para os solos OY, GM, GX e RU.....	69
TABELA 8	Estimativa dos parâmetros, significância e coeficientes de determinação (R^2) dos modelos ajustados apresentados na Tabela 7, e valores mínimos para a CMAP e quantidades ótimas de esterco bovino (MO) e calcário (Cal), em cada solo	69
TABELA 9	Modelos ajustados para o ITP (y) em função da aplicação de esterco bovino (MO) e calcário (Cal), para os solos OY, GM, GX e RU.....	74
TABELA 10	Estimativa dos parâmetros, significância e coeficientes de determinação (R^2) dos modelos ajustados apresentados na Tabela 9, e valores máximos para o ITP e quantidades ótimas de esterco bovino (MO) e calcário (Cal), em cada solo.....	74

TABELA 11	Valores de capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP), índice tampão de fósforo (ITP), Al trocável, pH e P remanescente (P rem) correspondentes à máxima produção de MSGR	75
TABELA 12	Coefficientes de correlação linear simples entre capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP), índice tampão de fósforo (ITP) e P remanescente (P rem) no tratamento testemunha e os correspondentes à produção máxima, com alguns atributos dos solos.....	76
TABELA 13	Coefficientes de correlação linear simples entre os valores da capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP), índice tampão de fósforo (ITP), Al trocável, pH e P remanescente (P rem) e entre essas variáveis com P mehlich-1 (Pmeh), matéria seca da parte aérea (MSPA), P foliar no florescimento (P flo), matéria seca de grãos (MSGR) e P acumulado na parte aérea (P acum), no tratamento testemunha e os correspondentes à produção máxima nos quatro solos.....	77

CAPÍTULO IV

TABELA 1	Modelos ajustados para o P lábil (y) em função da aplicação de esterco bovino (MO) e calcário (Cal), para os solos OY, GM, GX e RU.....	94
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 lábil e quantidades ótimas de esterco bovino (MO) e calcário (Cal), em cada solo.....	94
TABELA 3	Modelos ajustados para o P pouco lábil (y) em função da aplicação de esterco bovino (MO) e calcário (Cal), para os solos OY, GM, GX e RU.....	97
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 pouco lábil e quantidades ótimas de esterco bovino (MO) e calcário (Cal), em cada solo.....	97

TABELA 5	Modelos ajustados para o P não lábil (y) em função da aplicação de esterco bovino (MO) e calcário (Cal), para os solos OY, GM, GX e RU.....	100
TABELA 6	Estimativa dos parâmetros, significância e coeficientes de determinação (R^2) dos modelos ajustados apresentados na Tabela 5 e valores máximos para o P não lábil e quantidades ótimas de esterco bovino (MO) e calcário (Cal), em cada solo.....	100
TABELA 7	Valores de P lábil, P pouco lábil e P não lábil em relação à máxima produção.....	101
TABELA 8	Coeficientes de correlação linear simples entre P lábil, P pouco lábil e P não lábil com alguns atributos do solo, no tratamento testemunha e os correspondentes à produção máxima	102
TABELA 9	Coeficientes de correlação linear simples para os valores do P lábil, P pouco lábil e P não lábil e entre essas formas de fósforo com Capacidade Máxima de Adsorção de Fósforo (CMAP), Índice Tampão de Fósforo (ITP), Al tocável, pH, P remanescente (P rem) P mehlich-1 (Pmeh), matéria seca da parte aérea (MSPA), P foliar no florescimento (P flo), matéria seca de grãos (MSGGR) e P acumulado na parte aérea (P acum), no tratamento testemunha e os correspondentes à produção máxima nos quatro solos.....	104

LISTA DE FIGURAS

	CAPÍTULO II	Pág.
FIGURA 1	Representação gráfica da MSGR (g vaso^{-1}), em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (Cal), na forma de superfície de resposta, para os solos OY, GM, GX e RU.....	28
FIGURA 2	Corte horizontal sobre o espaço fatorial nas superfícies de resposta mostrando isoquantas correspondentes a diferentes faixas de valores para a MSGR (g vaso^{-1}), em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (Cal).....	29
FIGURA 3	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 OY, GM, GX e RU.....	32
FIGURA 4	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).....	33
FIGURA 5	Representação gráfica da foliar no P florescimento (g kg^{-1}), em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (Cal), na forma de superfície de resposta, para os solos OY, GM, GX e RU.....	36
FIGURA 6	Corte horizontal sobre o espaço fatorial nas superfícies de resposta, mostrando isoquantas correspondentes a diferentes faixas de valores para o P Florescimento (g kg^{-1}), em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (Cal).....	37
FIGURA 7	Representação gráfica da MSPA (g vaso^{-1}), em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (Cal), na forma de superfície de resposta, para os solos OY, GM, GX e RU.....	39

FIGURA 8	Corte horizontal sobre o espaço fatorial nas superfícies de resposta mostrando isoquantas correspondentes a diferentes faixas de valores para o MSPA (g vaso^{-1}), em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (Cal).....	40
FIGURA 9	Representação gráfica do acúmulo de P (mg vaso^{-1}) na parte aérea total do feijoeiro, em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (Cal), na forma de superfície de resposta, para os solos OY, GM, GX e RU.....	42
FIGURA 10	Corte horizontal sobre o espaço fatorial nas superfícies de resposta, mostrando isoquantas correspondentes a diferentes faixas de valores para o acúmulo P (mg vaso^{-1}), em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (Cal).....	43

CAPÍTULO III

FIGURA 1	Representação gráfica da 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 OY, GM, GX e RU.....	60
FIGURA 2	Corte horizontal sobre o espaço fatorial nas superfícies de resposta mostrando isoquantas correspondentes a diferentes faixas de valores para o P-rem (mg L^{-1}), em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (Cal)	61
FIGURA 3	Representação gráfica da CMAP (mg dm^{-3}), em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (Cal), na forma de superfície de resposta, para os solos OY, GM, GX e RU.....	67
FIGURA 4	Corte horizontal sobre o espaço fatorial nas superfícies de resposta, mostrando isoquantas correspondentes a diferentes faixas de valores para a CMAP (mg dm^{-3}), em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (Cal).....	68

FIGURA 5	Representação gráfica do ITP, em função da aplicação de esterco bovino (MO) e calcário (Cal), na forma de superfície de resposta, para os solos OY, GM, GX e RU....	72
FIGURA 6	Corte horizontal sobre o espaço fatorial nas superfícies de resposta, mostrando isoquantas correspondentes a diferentes faixas de valores para o ITP, em função da aplicação de esterco bovino (MO) e calcário (Cal)	73

CAPÍTULO IV

FIGURA 1	Procedimento simplificado de fracionamento seqüencial de fósforo (modificado de Hedley, Stewart e Ghauhan, 1982)	89
FIGURA 2	Representação gráfica da P lábil (mg dm^{-3}), em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (Cal), na forma de superfície de resposta, para os solos OY, GM, GX e RU.....	92
FIGURA 3	Corte horizontal sobre o espaço fatorial nas superfícies de resposta, mostrando isoquantas correspondentes a diferentes faixas de valores para o P lábil (mg dm^{-3}), em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (Cal). Os valores entre parentêses são a porcentagem da fração P lábil em relação ao P total	93
FIGURA 4	Representação gráfica da P pouco lábil (mg dm^{-3}), em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (Cal), na forma de superfície de resposta, para os solos OY, GM, GX e RU.....	95
FIGURA 5	Corte horizontal sobre o espaço fatorial nas superfícies de resposta, mostrando isoquantas correspondentes a diferentes faixas de valores para o P pouco lábil (mg dm^{-3}), em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (Cal). Os valores entre parênteses são a porcentagem da fração P pouco lábil em relação ao P total.	96

FIGURA 6	Representação gráfica da P não lábil (mg dm^{-3}), em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (Cal), na forma de superfície de resposta, para os solos OY, GM, GX e RU.....	98
FIGURA 7	Corte horizontal sobre o espaço fatorial nas superfícies de resposta, mostrando isoquantas correspondentes a diferentes faixas de valores para o P não lábil (mg dm^{-3}), em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (Cal). Os valores entre parentêses são a porcentagem da fração P HCl + residual em relação ao P total.	99
FIGURA 8	Representação gráfica do percentual das frações de P dos solos de várzea em relação ao fósforo total (P_{total}), no tratamento testemunha e os valores correspondentes à produção máxima.	103

RESUMO GERAL

ANDRADE, Alex Teixeira. **Dinâmica do fósforo em solos de várzea cultivado com feijoeiro sob influência da calagem e adubação orgânica.** 2005 117p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.¹

O presente estudo foi conduzido em casa de vegetação do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras, com o objetivo de avaliar os efeitos da incorporação de doses de resíduo orgânico e de calcário na adsorção e nas formas de fósforo em quatro solos de várzea e na nutrição fosfatada e produção do feijoeiro. Conduziram-se quatro experimentos com os solos Organossolo Mésico (OY), Gleissolo Melânico (GM), Gleissolo Háptico (GX) e Neossolo Flúvico (RU) em vasos contendo 3dm³. Foi utilizado o delineamento 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; 0,5; 1 e 2 vezes a dose recomendada para atingir V=70%), sendo incubados por 60 dias. Após a incubação, foi aplicada uma adubação básica com macro e micronutrientes e as doses de 299, 460, 359 e 345 mg dm⁻³ de P para os solos OY, GM, GX e RU, permanecendo por mais 30 dias em incubação. Após este período, foram cultivadas três plantas de feijoeiro por vaso, sendo retirada uma planta no florescimento e o restante no final do ciclo. As variáveis avaliadas foram produção total de matéria seca da parte aérea (MSPA), produção de grãos (MSGR), teor foliar de P no florescimento (P florescimento) e o acúmulo de P (P acum). Nos solos, avaliaram-se o fósforo remanescente (P-rem), capacidade máxima de adsorção de P (CMAP), índice tampão de P (ITP), pH, Al trocável e as formas de P no solo. A calagem e a adubação orgânica promoveram aumento na MSPA, MSGR, P florescimento e P acum. Com relação aos solos, houve redução significativa na CMAP, Al trocável e aumento do P rem, pH e nas formas de P no solo.

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

GENERAL ABSTRACT

ANDRADE, Alex Teixeira. **Phosphorus dynamics in lowland soils cultivated with beans under influence of liming and organic fertilization.** 2005. 117p. Thesis (Doctorate in Soils and Plant Nutrition) – Federal University of Lavras, Lavras, MG.

The present study was carried out under greenhouse conditions at the Soil Science Department of the Federal University of Lavras with the purpose of evaluating the effects of organic residues and liming doses on the adsorption and the forms of P in the soil, P nutrition, and bean production in four lowland soils. Four experiments were conducted using the following soils: Mesic Organosol (OY), Melanic Gleysol (GM), Haplic Gleysol (GX) and Fluvisol (RU) in 3 dm³ pots. It was used a completely randomized design in a 4x5 factorial scheme with four replicates. The treatments were a combination of five doses of bovine manure (0%; 0.5%; 5.0%; 7.5% and 10% of the total volume of soil) with four doses of limestone (0; 0.5; 1 and 2 times the dose recommended to reach base saturation = 70%). The soil samples were incubated during 60 days. After the incubation phase, a basic fertilization with macro and micronutrients was applied, and the doses of 299, 460, 359, and 345 mg dm⁻³ of P were applied, respectively, for OY, GM, GX and RU soils samples, which were incubated for further 30 days. After this period, three plants per pot were cultivated, being one plant removed at the flowering and the others at the end of the cycle. The variables were shoot total dry matter yield (MSPA), grain yield (MSGR), P content in leaf at flowering (P flowering), and P accumulation (P accum). In soil samples, it was evaluated the remaining P (P-rem), maximum capacity of P adsorption (CMAP), P buffer index (ITP), pH, exchangeable Al and the forms of P in soil. Both liming and organic fertilization promoted an increase in MSPA, MSGR, P at flowering, and P accum. In relation to the soil, there was a significant reduction in CMAP, exchangeable Al, and increase of P rem, and in all forms of P in soil.

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

CAPÍTULO I

1 INTRODUÇÃO

A região Sul de Minas Gerais possui 200.000 hectares de várzea irrigáveis sem aproveitamento racional (Provárzeas, 1981). A topografia favorável à irrigação e a disponibilidade de água abrem perspectivas para a produção de duas ou mais colheitas por ano, dependendo das espécies cultivadas. No período chuvoso, o excesso de água e as dificuldades de drenagem favorecem o cultivo do arroz inundado e, no período da seca, espécies, como feijão, trigo, ervilha e outras, poderão ser cultivadas (Moraes e Dynia, 1992).

Em trabalhos anteriores conduzidos no Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras, verificou-se que o fósforo é um dos nutrientes mais limitantes para o cultivo do feijoeiro em solos de várzea drenados (Andrade, 1997). Fernandes et al. (2000), em outro trabalho, constataram que as quantidades de fósforo a serem aplicadas para a obtenção de 90% da máxima produção de grãos de feijão, em casa de vegetação, são elevadas, 299, 460, 359 e 345 mg dm⁻³ de P para os solos Organossolo Mésico (OY), Gleissolo Melânico (GM), Gleissolo Háptico (GX) e Neossolo Flúvico (RU), respectivamente, devido à fixação do fósforo aplicado.

Recentemente, Andrade, Fernandes e Faquin (2003), trabalhando com estes mesmos solos, verificaram que a aplicação de resíduo orgânico, calcário - pela elevação do pH e redução dos teores de Al trocável - e gesso - pela redução de Al trocável - reduz a fixação de fósforo.

A aplicação de resíduos orgânicos reduz a fixação de fósforo no solo e aumenta a eficiência de utilização dos fertilizantes fosfatados aplicados (Hue, 1990). Está é uma prática atrativa, particularmente em países subdesenvolvidos, como uma alternativa de baixo custo para reduzir a aplicação de fertilizantes inorgânicos e corretivos (Iyamuremye, Dick e Baham, 1996). Segundo Sah et al.

(1989a), em solos submetidos a ciclos de inundação-drenagem, a adição de resíduos orgânicos diminui a fixação de fósforo e altera a distribuição das frações fosfatadas, principalmente as frações orgânicas, que correspondem a mais de 50% do fósforo total desses solos.

Os resíduos orgânicos, ao interagirem com o solo, podem ter efeitos similares ao do calcário (carbonatos de cálcio e de magnésio) pela precipitação de ferro e alumínio (Hue, 1992), e aos do gesso (sulfato de cálcio), pela complexação do alumínio trocável (Ritchey et al., 1980). No entanto, segundo Iyamuremye & Dick (1996), o conhecimento dos efeitos da aplicação de resíduos orgânicos em solos sob ciclos de inundação-drenagem é limitado e os resultados encontrados, contraditórios.

Este trabalho teve por objetivo verificar os efeitos da incorporação de doses de resíduo orgânico e de calcário na adsorção e nas formas de fósforo em quatro solos de várzea e na nutrição fosfatada e produção do feijoeiro.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Os solos de várzea são uma opção de exploração agrícola por causa da topografia favorável à mecanização e da disponibilidade de água para a irrigação, com possibilidade de intensa utilização e aumento da produção de alimentos em até seis vezes, em comparação às áreas não irrigadas.

A possibilidade de utilização de irrigação contínua nos solos de várzea é um aspecto de suma importância, considerando-se a seca e, ou, os veranicos, que são identificados como importantes entraves para a agricultura nas regiões onde está inserida (Abreu, Lopes e Andrade, 1987).

Os solos de várzea são, na sua maioria, ácidos, com baixa fertilidade natural, especialmente em fósforo (Fageria & Stone, 1999). O baixo teor de fósforo disponível no solo é a limitação nutricional mais generalizada na produção agrícola nos trópicos (Sanchez & Salinas, 1981) e a maioria das culturas no Brasil apresenta resposta à aplicação deste nutriente (Oliveira et al, 1982).

A fração inorgânica de P no solo apresenta-se sob as seguintes formas: P solúvel do solo (P solução); P lábil, aquele precipitado ou adsorvido à fase sólida do solo, mas em equilíbrio com o P solução e P não lábil, caracterizado como aquele que, em curto prazo, não pode passar rapidamente à forma P-solução por estar envolvido em reações de precipitação com diferentes cátions ou adsorvido com alta energia à fase sólida (Larsen, 1967).

Um dos fatores responsáveis pelo baixo teor de fósforo disponível no solo é a adsorção específica de fosfato por meio da troca de ligantes com o grupo OH da superfície de óxidos, hidróxidos e oxidróxidos de ferro e alumínio, e bordas de minerais cristalinos e amorfos (Parfitt, 1978).

A adsorção pode ser definida como a acumulação de uma substância ou material na interface entre a superfície sólida e a solução. Ela representa a

remoção de moléculas de soluto (uma substância dissolvida em um solvente) da solução para a superfície sólida e conseqüente ligação da molécula de soluto à superfície (Stumm, 1992). O íon fosfato pode ser adsorvido especificamente por óxidos de ferro, alumínio e manganês, nas arestas das argilas silicatadas e nos aluminossilicatos amorfos, com a participação dos grupos OH^- ou OH_2^+ monocoordenados, os quais facilitam a protonação e as reações de trocas de ligantes (McBride, 1994).

A adsorção pode ser diferenciada em dois grupos, considerando o grau e o tipo de ligação entre o P e a superfície adsorvente da partícula do solo, denominados de adsorção específica e não específica (Fassbender, 1987). O primeiro caso trata de uma ligação química de natureza covalente, com elevada força de atração, independente da carga existente em sua superfície e resulta em P não lábil com o passar do tempo. No segundo caso, ocorre uma atração eletrostática entre os ligantes, influenciada pelo pH, a qual é essencial que o pH esteja abaixo do ponto de carga zero, possibilitando a formação de carga positiva nos colóides de carga variável.

A adsorção de fósforo ocorre na forma binucleada e em três estádios, conforme o tempo de reação: no primeiro, a reação dá-se rápida e fortemente em sítios muito reativos, em que silicatos, OH^- e OH_2^+ , são trocados por fosfato; no segundo, a longo prazo, migra, via porosidade, para os lóbulos internos dos cristais, podendo, também, ser considerado como precipitado (Parfitt, 1989).

Além da fração inorgânica que ocorre no solo, existe a fração orgânica que pode ser derivada dos resíduos de plantas e tecidos da flora e fauna do solo e resíduos que resistem à rápida hidrólise. A quantificação do P orgânico é necessária para melhor entender a mineralização-imobilização do P sob um ambiente particular e sob sistema de cultivo em solos (Kuo, 1996).

Sistemas naturais, como florestas e campos nativos, conseguem se auto-sustentar sem a adição de fertilizantes fosfatados, mesmo em solos com baixa

disponibilidade de P (Anghinoni, 2004). A disponibilidade é controlada pela ciclagem do P orgânico (Tiessen et al., 1983; Guggenberger et al., 1996), considerando como fonte potencial de P pela decomposição microbiana, sendo o P contido na biomassa bacteriana considerado a fração lábil.

A forma predominante de acúmulo é a inorgânica, especialmente nas frações moderadamente lábeis (Gatibone, 2003). O acúmulo no compartimento biológico pode ocorrer em solos com menores teores de argila e de óxidos de ferro, com o cultivo em semeadura direta e com a utilização de plantas com alta adição de biomassa (Rheinheimer & Anghinoni, 2003).

A absorção de P pelas plantas em solos que acumularam este nutriente (pela adição de fertilizantes fosfatados, sem posterior reposição) desencadeia um processo contínuo de depleção com o decorrer do tempo: inicialmente, das formas lábeis (inorgânicas e orgânicas), em seguida, das moderadamente lábeis e, finalmente, até das mais recalcitrantes, de forma a dessorver a maior parte do P adicionado (Gatibone, 2003).

O pH afeta a solubilidade dos minerais, as formas dominantes dos íons em solução, as reações de adsorção-dessorção e a atividade microbiana, responsável pela decomposição dos compostos orgânicos. O aumento do pH de 4,0 até 6,5 resulta em aumento do P em solução e, conseqüentemente, da sua disponibilidade para as plantas. Fatores, como potencial redox, temperatura do solo e força iônica da solução podem afetar a liberação do P da fase sólida para a solução, aumentando-a ou diminuindo-a (Anghinoni, 2004).

O efeito do pH na adsorção do fosfato varia com a constituição mineralógica do solo e com a faixa de pH estudada (Haynes, 1982). O pH influi na proporção dos ânions H_2PO_4^- e HPO_4^{2-} na solução do solo, na quantidade de cargas elétricas negativas e positivas, ou seja, no potencial elétrico na superfície dos colóides com cargas elétricas variáveis e na formação de polímeros de alumínio em elevada capacidade de retenção de fosfatos (Haynes, 1982)

As condições criadas pela inundação do solo influenciam a dinâmica do fósforo no solo, ocasionando aumento de sua disponibilidade, a qual é atribuída à redução do fosfato férrico a fosfato ferroso; hidrólise dos fosfatos e ânions orgânicos; deslocamento do fósforo dos fosfatos de ferro e alumínio por agentes quelantes produzidos pela decomposição anaeróbica da matéria orgânica; liberação do fósforo da matéria orgânica; liberação do fósforo nos solos calcários e remoção da capa de óxidos de ferro hidratados, que recobre fosfatos pela redução do ferro (Ponnanperuma, 1972).

Entretanto, de acordo com Sayal & De Datta (1991), quando um campo de arroz inundado é drenado, ocorre a reoxidação dos constituintes reduzidos do solo com mudanças no Eh, pH e concentração de Fe^{+2} , diminuindo a solubilidade, tanto do fósforo nativo do solo quanto do fósforo aplicado. Segundo Willett & Higgins (1978), o decréscimo da disponibilidade de P no solo com a drenagem está associada ao aumento da adsorção de P, ocasionada pelo aumento da atividade dos óxidos de ferro.

Willett (1986) observou aumento da capacidade máxima de adsorção de fósforo e da energia de ligação estimada pela isoterma de Langmuir, com a drenagem de solos inundados, ocorrendo deficiência na disponibilidade de P para o milho cultivado após arroz inundado. Este autor sugeriu que tal deficiência estava mais relacionada à forte fixação de P pelo solo seco do que pela imobilização durante a inundação.

Guilherme et al. (2000), trabalhando com alguns solos de várzea do estado de Minas Gerais, observaram que houve correlação positiva entre a capacidade máxima de adsorção de fósforo e o teor de matéria orgânica do solo, devido, principalmente, a um aumento da fração de óxidos de ferro com menor grau de cristalinidade do solo e, conseqüentemente, maior capacidade de adsorção de ânions.

A quantidade de P que entra pelas fontes orgânicas geralmente não supre suficientemente o fósforo para o crescimento de culturas, devido à baixa concentração nos tecidos (Palm, 1995), mas, um aumento na quantidade de fontes orgânicas pode aumentar a disponibilidade de fósforo fixado pelos solos (Iyamuremye & Dick, 1996). Isto é, ácidos orgânicos formados pela decomposição de resíduos orgânicos competem com o fósforo pelo mesmo sítio de adsorção, ocorrendo, assim, maior disponibilidade de fósforo (Hue, 1991).

Mesmo em solos ricos em matéria orgânica que apresentam uma significativa adsorção de fósforo e mesmo que os efeitos do bloqueio dos componentes orgânicos sejam por pouco tempo, o efeito da matéria orgânica em retardar a sorção de fósforo pode ser vantajosamente explorada para viabilizar a máxima utilização de fertilizantes fosfatados (Afif et al., 1995).

O tipo de ácido orgânico 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, que formam complexos estáveis hidrosolúveis 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.

Ainda sobre fontes orgânicas utilizadas, Silva et al. (1997), estudando os sistemas de cultivos com adubos verdes, obtiveram diferentes valores de capacidade máxima de adsorção de fósforo, tendo a seguinte ordem decrescente: solo descoberto, guandu, crotalária, mucuna preta, braquiária e cerrado nativo.

A qualidade dos ácidos orgânicos secretados é mais importante que a quantidade; dentre eles, os mais efetivos são aqueles que têm propriedade de formar quelados com os cátions (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.

Gerke & Hermann (1992) estudaram um modelo experimental de adsorção de ortofosfato em superfícies de complexos ácidos húmicos-ferro amorfo sintético e constataram que o aumento do pH de 5,2 para 6,2 propiciou uma diminuição na adsorção de fósforo da ordem de 30%. Uma série de trabalhos dá suporte a esta 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 estes 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.

No estudo da influência do oxalato e da matéria orgânica no solo na sorção e dessorção de fosfato, Bhatti et al. (1998) observaram que, na sorção de fosfato, houve uma redução significativa tanto com a presença do oxalato (maior de 30%) quanto da matéria orgânica do solo.

Lopes-Hernandez, Siegert & Rodriguez (1986) observaram que a presença de malato ou de oxalato reduziu a adsorção de fósforo e essa redução depende da concentração do ácido orgânico e, também, de como foram adicionados o ânion orgânico e o fosfato. A maior redução ocorreu quando o fosfato foi introduzido depois que o ânion orgânico foi aplicado.

Almeida, Torrent & Barrón (2003) observaram que houve aumento na adsorção de P devido à redução dos teores de matéria orgânica em profundidade em Latossolos desenvolvidos de basalto do extremo-sul do Brasil.

Marchi (2001) verificou que os anions orgânicos (citrato e oxalato) têm grande afinidade por solos de carga variável. 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 e cálcio pela decomposição do resíduo. O sulfato forma 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, em solos com baixo pH.

A utilização de outro resíduo orgânico, como o biosólido, proporcionou a redução na adsorção de P e também diminuiu os índices de intensidade de sua fixação (Sui & Thompson, 2000).

No solo, o fósforo está presente na forma iônica e em compostos na solução do solo, adsorvido na superfície dos constituintes mineralógicos do solo, em minerais cristalinos e amorfos, e componente da matéria orgânica (Baber, 1984). Sendo assim, o fracionamento de P proposto por Hedley et al. (1982) baseia-se na extração sequencial de formas lábeis, pouco lábeis e não lábeis de P, por meio das quais as formas inorgânicas e orgânicas são separadas conforme a sua disponibilidade para as plantas. Pode também ser empregado para acompanhar modificações nas formas de P no solo (Araújo & Salcedo, 1997).

As formas lábeis referem-se ao P disponível (P-resina) e ao P inorgânico (Pi) e orgânico (Po) adsorvido na superfície dos colóides (P-NaHCO₃). O P microbiano (P-NaHCO₃/CH₃Cl) constitui uma subfração do P-NaHCO₃ obtida pela diferença entre o P determinado antes e após a quebra das células microbianas por clorofórmio (CH₃Cl). As formas pouco lábeis referem-se às formas inorgânicas ligadas a Fe e Al e orgânicas associadas aos compostos

húmicos (P-NaOH), além de formas orgânicas e inorgânicas localizadas no interior de agregados, obtidas por ultra-sonificação no extrato residual de NaOH. As formas consideradas não lábeis correspondem ao P ligado a Ca (P-HCl) e ao P residual, referente às formas mais estáveis de Po e às formas insolúveis de Pi, sendo muito resistentes à decomposição (Daroub et al., 2000), cuja extração é obtida por meio de digestão com H_2SO_4 e H_2O_2 .

Este método de fracionamento é um divisor metodológico importante, pois, a partir dele, trabalhos têm sido realizados com solos de regiões temperadas e, mais recentemente, em solos intemperizados (Tokura, et al., 2002; Silva et al., 2003; Souza, 2005). O interesse na utilização desse método para o estudo da dinâmica do P em solos das regiões tropicais e subtropicais tem aumentado e envolve, especialmente, a adição de fertilizantes e o manejo do solo para avaliar mudanças de formas de P (Tokura, 2004).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, C. A. DE; LOPES, A.S.; ANDRADE, D. DE S. Identificação de deficiências de micronutrientes em cinco solos de várzea da região de cerrados de Minas Gerais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 22, n.8, p. 833-841, ago. 1987.
- 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, p.207-211, mar. 1995.
- ALMEIDA, J.A.; TORRENT, J.; BARRÓN, V. Cor de solo, formas de fósforo e adsorção de fosfatos em Latossolos desenvolvidos de basalto do extremo-sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v. 27, n.6, p. 985-1002, nov/dez. 2003.
- ANDRADE, A. T.; FERNANDES, L. A.; FAQUIN, V. Organic residue, limestone, gypsum, and phosphorus adsorption by lowland soils. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.59, n.2, p. 349-355, abr/jun., 2003.
- ANDRADE, C.A. de B. **Limitações de fertilidade e efeito do calcário para o feijoeiro em solos de várzea do sul de Minas Gerais**. Lavras, Universidade federal de Lavras, 1997. 107p. (Tese de Doutorado).
- ANGHINONI, I Fatores que interferem na eficiência da adubação fosfatada. In.: Yamada, T; Abdalla, S. R. S. e; **Anais do simpósio sobre fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba:POTAFOS, p. 537-562. 2004.
- 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**, Campinas, v. 21, n. 4, p. 643-650, out./dez. 1997
- BARBER, S.A. **Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach**. New York: Wiley Interscience, 1984. 398 p.
- 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 America Journal**, Madison, v.62, n.4, p.1089-1095, July/aug. 1998.

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.

FAGERIA, N.K.; CARVALHO, A.M. **Manejo da acidez de solos de cerrado e de várzea do Brasil**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 1999. 42 p. (Embrapa Arroz e Feijão. Documentos, 92).

FASSBENDER, H. W. **Química del y suelos com énfasis en suelos de América Latina**. 2. ed. San José: IICA, 1987. 420 p.

FERNANDES, L. A.; FAQUIN, V.; ANDRADE, A. T.; OLIVEIRA JUNIOR, A. C. DE; FURTINI NETO, A. E.; CURTI, N. Produção e níveis críticos de fósforo do feijoeiro cultivado em solos de várzea. **Ciência & agrotecnologia**, Lavras, v. 25, n.5, p. 1133-1141, set./out. 2001.

FERNANDES, L.A.; FAQUIN, V.; FURTINI NETO, A.E.; CURTI, N. Frações de fósforo e atividade da fosfatase ácida em plantas de feijoeiro cultivadas em solos de várzeas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, n.3, p.561-571, jul./set. 2000.

GATIBONE, L. P. **Disponibilidade de formas de fósforo do solo às plantas**. 2003. 245. Tese (Doutorado em Agronomia) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

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.

GUGGENBERGER, G.; HAUMAYER, L.; THOMAS, R.F. Assessing the organic phosphorus status of an Oxisol under tropical pastures following native savanna using ³¹P NMR spectroscopy. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v.23, n.3, p. 332-339, oct. 1996.

GUILHERME, L.R.G.; CURTI, N.; SILVA, M.L.N.; RENÓ, 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.

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.

HUE, N.V. Correcting soil acidity of a highly weathered ultisol with chicken manure and sewage sludge. **Communications Soil Science Plant Analysis**, New York, n.3-4, v.23, p.241-264, 1992.

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.

HUE, N.V. Interaction of $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ applied to an Oxisol and previous sludge amendment: soil and crop response. **Communications Soil Science Plant Analysis**, New York, n.1-2, v.20, p.61-73, 1990.

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.; BAHAM, J. Organic amendments and phosphorus dynamics: I. phosphorus chemistry and sorption. **Soil Science**, Baltimore, n.7, v.161, p.426-435, July. 1996.

KUO, S. Phosphorus. In: SPARKS, D. L. (ED.) **Methods of soil analysis**. Part 3 – Chemical Methods. Madison: Soil Science Society of America, 1996. p. 869-919.

LARSEN, S. Soil phosphorus. **Advances in Agronomy**, New York, v. 19, p. 151-211, 1967.

LOPEZ-HERNANDEZ, D.; SIEGERT, G.; RODRÍGUEZ, J. V. Competitive adsorption of phosphate with malate and oxalate by tropical soil. **Soil Science Society America Journal**, n.6, v. 50, p. 1460-1462, Nov./Dec. 1986.

MARCHI, G. **Interações de ânions orgânicos e inorgânicos com solos de carga variável**. LAVRAS: UFLA, 2001. 75 p. (Dissertação – Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas)

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

MICHOUSTINE, E.N. Processus microbiologiques mobilisant les composés du phosphore dans le sol. **Revue Ecologie et de Biologie du Sol**, Montrouge, 9:521-528, 1972.

MORAES, J.F.V.; DYNIA, J.F. Alterações nas características químicas e físico-químicas de um solo Gley Pouco Húmico sob inundação e após a drenagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, n.2, v.27, p.223-235, Fev. 1992.

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

OLIVEIRA, A. J.; LOURENÇO, S.; GOEDERT, W. J. **Adubação fosfatada no Brasil**. Brasília, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 1982. 326 p.

PALM, C. A. Contribution of agroforestry trees to nutrient requirements of intercropped plants. **Agrofor. System**. 30:105-124., 1995.

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

PARFITT, R.L. Phosphate reactions with natural allophane, ferrihydrite and goethite. **J. Soil Science**. Baltimore, 40:359-369, 1989.

PONNAPERUMA, F.N. The chemistry of submerged soils. **Advance in Agronomy**. New York, 24:28-96, 1972.

PROVARZEAS. **Programa nacional para o aproveitamento de terras de várzea irrigáveis - PROVARZEAS** - Brasil. Brasília, DF, 1981, n.p.

RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I. Accumulation of soil organic phosphorus by soil tillage and cropping systems in subtropical conditions. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, n.15-16, v. 15 e 16, p. 2339-2354, 2003.

RITCHEY, K.D.; SOUZA, M.G.; LOBATO, E.; CORREA, A. Calcium leaching to increase rooting depth in a Brazilian Savannah Oxisol. **Agronomy Journal**, Madison, n.1, v.72, p.40-44, Jan./Feb. 1980.

SAH, R.N.; MIKKELSEN, D.S.; HAFEZ, A.A. Phosphorus behavior in flooded-drained soils. II. Iron transformation and phosphorus sorption. **Soil Science Society America Journal**, Madison, n.6, v.53, p.1729-1732, Nov./Dec., 1989a.

SANCHES, P. A.; SALINAS, J. G. Low-input technology for managing Oxisol and Ultisols in tropical America. **Advances in Agronomy**, New York, 34: 279-406 p., 1981.

SAYAL, S.K.; DE DATTA, S.K. Chemistry of phosphorus transformations in soil. **Advances in Soil Science**, New York, 16:2-120, 1991.

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

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, M.L.N.; CURI, N.; BLANCANEAUX, P.; LIMA, J.M. de; CARVALHO, A.M. de. Rotação adubo verde - milho e adsorção de fósforo em latossolo vermelho-escuro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.32, n.6, p.649-654, jun. 1997.

SOUZA, R. F de **Dinâmica de fósforo em solos sob a influencia da calagem e adubação orgânica, cultivados com Feijoeiro**. Lavras, 141 p., 2005. (Tese – Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas)

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

STUMM, W. **Chemistry of the solid-water interface**. New York: John Wiley and Sons, 1992. 428 p.

SUI, Y.; THOMPSON, M. L. Phosphorus sorption, desorption, and buffering capacity in a biosolids-amended mollisol. **Soil Science Society American Journal**, Madison, n.1, v. 64, p. 164-169, Jan/Feb. 2000.

TIESSEN, H.; STEWART, W.B.; MOIR, J.O. Changes in organic and inorganic phosphorus composition of two grassland soils and their particles size fractions during 60-90 years of cultivation. **Journal of Soil Science**, Oxford, n.4, v. 34, p. 815-823, Dec. 1983.

TOKURA, A. M. **Efeito do silício nas frações fosfatadas de solos cultivados com arroz e feijoeiro**. (Doutorado em solos e nutrição de plantas) 2004. UFLA. Lavras – MG. 125p.

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.

WILLETT, I.R. Phosphorus dynamics in relation to redox processes in flooded soils. **INTERNATION CONGRESS IN SOIL SCIENCE**, 13, Hamburg, 6:748-755, 1986.

WILLETT, I.R.; HIGGINS, M.L. Phosphate sorption by reduced and reoxidized rice soils. **Australian Journal Soil Research**, Melbourne, n.3, v.16, p.319-326, 1978.

CAPÍTULO II
CALAGEM E ESTERCO BOVINO NA NUTRIÇÃO FOSFATADA E
PRODUÇÃO DO FEJJOEIRO EM SOLOS DE VARZEA

RESUMO

ANDRADE, Alex Teixeira. Calagem e esterco bovino na nutrição fosfatada e produção do feijoeiro em solos de várzea. In: **_____ Dinâmica do fósforo em solos de várzea cultivados com feijoeiro sob influência da calagem e adubação orgânica.** 2005 117p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.¹

O presente estudo foi conduzido em casa de vegetação do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras, com o objetivo de avaliar o efeito da calagem e da aplicação de esterco bovino sobre a disponibilidade de P, nutrição fosfatada e produção do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivado em quatro solos de várzea. Conduziram-se quatro experimentos com os solos Organossolo Mésico (OY), Gleissolo Melânico (GM), Gleissolo Háptico (GX) e Neossolo Flúvico (RU) em vasos contendo 3dm³. Foi utilizado o delineamento 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; 0,5; 1 e 2 vezes a dose recomendada para atingir V=70%) nos quais foram cultivados três plantas de feijoeiro. Foram avaliadas as produções totais de matéria seca da parte aérea (MSPA), produção de grãos (MSGR), teor foliar de P no florescimento (P florescimento), acúmulo de P (P acum) e a disponibilidade do P pelo extrator Melhich 1. A adição de esterco bovino e calcário, em todos os solos de várzea estudados, aumentou a disponibilidade do P pelo Mehlich 1 e, com isso, aumentaram também o P foliar, o P acumulado, a MSPA e a MSGR do feijoeiro.

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

ABSTRACT

ANDRADE, Alex Teixeira. Liming and bovine manure in the phosphate nutrition and plant bean production in lowland soils. In _____ **Phosphorus dynamics in lowland soils cultivated with beans under influence of liming and organic fertilization**. 2005. 117p. Thesis (Doctorate in Soils and Plant Nutrition) – Federal University of Lavras, Lavras, MG.

The present study was conducted in greenhouse in the Soil Science Department of the Federal University of Lavras with the purpose of evaluating the effect of liming and application of bovine manure on P availability, phosphate nutrient and yield of bean plant (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivated in four lowland soils. Four experiments with the soils Mesic Organosol (OY), Melanic Gleysol (GM), Haplic Gleysol (GX) and Fluvisol Neosol (RU) were conducted in pots containing 3dm³. The completely randomized design in 4x5 factorial scheme with four replicates, the treatments consisting of 5 doses of bovine manure (0%; 2.5%; 5.0%; 7.5% and 10% of the total volume of soil) and 4 doses of limestone (0; 0.5; 1 and 2 times the dose recommended to reach V=70%), in which three bean plants were cultivated. The shoot total dry matter yields (MSPA), grain yield (MSGP), P content leaf at flowering (P flowering), P accumulation (P accum) and P availability by the Mehlich extractor 1 were evaluated. Addition of bovine manure and limestone in all the lowland soils studied, increased P availability by the Mehlich 1 and so increased also leaf P, accumulated P, MSPA and MSGP of the bean plant.

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

1 INTRODUÇÃO

O feijão, no Brasil, além de grande destaque econômico, possui um grande significado social, pois é uma das principais fontes de alimento rico em proteínas (Fageria, Barbosa Filho & Stone, 2004). Ainda de acordo com estes autores, o feijoeiro possui baixa produtividade devido, principalmente, à baixa fertilidade e à elevada acidez dos solos, à deficiência hídrica, à susceptibilidade da cultura a doenças e pragas e ao uso de baixa tecnologia pela maioria dos produtores.

Esta baixa fertilidade e alta acidez são características predominantes em solos de várzea, sendo considerados solos extremamente limitantes no fornecimento de P (Andrade et al., 2000, Junqueira, 2001). Esta limitação no fornecimento do P, segundo Willett (1986), deve-se, principalmente, à forte fixação do P pelo solo drenado.

A forte fixação do P pelo solo drenado pode ter o seu efeito reduzido pela utilização de resíduo orgânico e pela calagem (Andrade, Fernandes e Faquin, 2003), pelo bloqueio dos sítios de adsorção (Hue, 1991) e, quando utilizada uma adubação fosfatada, poderá ter o uso mais eficiente desta fonte para a nutrição e produção das culturas.

Objetivou-se com este estudo avaliar o efeito da calagem e da aplicação de esterco bovino sobre a disponibilidade de P, a nutrição fosfatada e a produção do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivado em quatro solos de várzea.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Conduziram-se, simultaneamente, quatro experimentos, utilizando quatro solos de várzeas, representantes das classes Organossolo Mésico (OY), Gleissolo Melânico (GM), Gleissolo Háptico (GX) e Neossolo Flúvico (RU), principais solos encontrados em várzeas do estado de Minas Gerais (EMBRAPA, 1999), provenientes de uma propriedade particular, no município de Lavras, MG, nas coordenadas 21°16'53,7" S e 44°57'54,9" W, a 927 m de altitude.

As amostras foram coletadas na camada de 0-20 cm nos diferentes solos, sob vegetação natural, tomando-se o cuidado de retirar a vegetação e os restos orgânicos presentes na superfície. Estas amostras foram destorroadas, secas ao ar e passadas em peneira com malha de 4 mm de abertura. Ao mesmo tempo, foram tomadas subamostras dos diferentes materiais de solo e passadas em peneira de 2 mm de abertura, para as caracterizações físicas, químicas e mineralógicas da fração terra fina seca ao ar (TFSA) (Tabela 1).

Em cada experimento, o delineamento utilizado foi o inteiramente casualizado, em esquema fatorial 4x5, sendo 4 doses de calcário e 5 doses de resíduo orgânico, com quatro repetições, utilizando-se vasos de três dm³.

Como resíduo orgânico, foi usado o esterco de curral, seco a 60°C e moído (peneira de 1 mm²), aplicando-se 5 doses correspondentes a 0%, 2,5%, 5%, 7,5% e 10% do volume total do solo, sendo 0, 75, 150, 225 e 300 cm³ por vaso. O resíduo foi analisado quimicamente para N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Mn e Zn, de acordo com Tedesco et al. (1995) (Tabela 2).

Utilizaram-se quatro níveis de calagem correspondentes a 0; 0,5; 1 e 2 vezes a dose recomendada para elevar a saturação por bases a 70% por meio de curvas de incubação (Azevedo, 1999), usando CaCO₃ + MgCO₃4Mg(OH).2,5H₂O p.a. na relação equivalente Ca:Mg de 4:1. Estas doses foram correspondentes a 0, 1,75, 3,5 e 7,0 Mg ha⁻¹ para o solo OY; 0, 3,65, 7,3 e

14,6 Mg ha⁻¹ para o solo GM; 0, 1,35, 2,7 e 5,4 Mg ha⁻¹ para o solo GX e 0, 2,2, 4,4 e 8,8 Mg ha⁻¹ para o solo RU.

TABELA 1 Atributos químicos, físicos e mineralógicos dos solos antes da aplicação dos tratamentos.

Químicos												
Solo	pH ⁽¹⁾	P ⁽¹⁾	K ⁽¹⁾	Ca ⁽¹⁾	Mg ⁽¹⁾	Al ⁽¹⁾	H+Al ⁽¹⁾	T	m	V	P-rem ⁽²⁾	CMAP ⁽²⁾
		mg dm ⁻³				cmol _c dm ⁻³			----	----	mg L ⁻¹	mg dm ⁻³
OY	5,2	7,5	89	2,5	1,5	0,5	7,9	12,1	11	34,9	9,7	1012
GM	4,7	9,3	91	0,7	0,2	2,5	17,1	18,2	69	6,2	4,9	3476
GX	5,3	2,8	63	1	0,9	0,8	5	7,1	28	29,2	16,2	599
RU	5,2	4,9	48	0,4	0,2	1,1	6,3	7,0	60	10,3	8,8	1133
Físicos												
	Areia grossa ⁽¹⁾		Areia Fina ⁽¹⁾		Silte ⁽¹⁾		Argila ⁽¹⁾		Matéria orgânica ⁽¹⁾			
					g kg ⁻¹							
OY	0		90		530		380		60			
GM	7		133		420		440		199			
GX	40		570		210		180		36			
RU	30		260		360		350		20			
Mineralógicos												
	SiO ₂ ⁽³⁾	Al ₂ O ₃ ⁽³⁾	Fe ₂ O ₃ ⁽³⁾	TiO ₂ ⁽³⁾	P ₂ O ₅ ⁽³⁾	Fe _d ⁽⁴⁾	Fe _o ⁽⁴⁾	Ct ⁽⁴⁾	Gb ⁽⁴⁾	Ki ⁽⁵⁾		
	----- g kg ⁻¹ -----											
OY	243,4	247,1	42,8	7,3	0,48	1,6	0,16	36	18	1,67		
GM	126,1	175,5	13,3	5,5	1,52	0,9	0,21	18	20	1,22		
GX	84,2	112,2	13,0	6,2	0,10	0,3	0,11	12	3,4	1,28		
RU	209,3	221,1	74,5	9,3	0,51	4,3	0,17	50	17	1,61		

⁽¹⁾ pH = pH em água; P = fósforo extraído pelo Mehlich-1 1; K = potássio; Ca = cálcio; Mg = magnésio; Al = alumínio; H+Al = acidez potencial; T = capacidade de troca de cátions a pH 7,0; m = saturação por Al e V = saturação por bases; areia grossa; areia fina; silte; argila; matéria orgânica; (EMBRAPA, 1997);

⁽²⁾ Prem = P remanescente (Alvarez V. et al., 2000) e CMAP = capacidade máxima de adsorção de P (Alvarez V. e Fonseca, 1990);

⁽³⁾ Óxidos do ataque sulfúrico (EMBRAPA, 1997);

⁽⁴⁾ Fe_d = ferro extraído pelo ditionito-citrato-bicarbonato (Mehra e Jackson, 1960); Fe_o = ferro extraído pelo oxalato ácido de amônio; Ct = caulinita; Gb = gibbsita determinados na fração argila e corrigidos para terra fina.

⁽⁵⁾ Ki – relação molecular SiO₂/Al₂O₃.

Amostras de quatro dm^{-3} de cada solo receberam os tratamentos de calagem e de esterco de curral e foram incubadas por 60 dias com umidade correspondentes à capacidade de campo.

TABELA 2 Teores totais de nutrientes no resíduo (esterco de curral).

Macronutrientes	g kg^{-1}	Micronutrientes	mg kg^{-1}
N	18,00 (0,833)*	Mn	449,35 (20,798)**
P	3,37 (0,156)	Fe	11014 (509,73)
K	14,23 (0,658)	Cu	21,95 (1,016)
S	2,61 (0,121)	Zn	78,50 (3,633)
Ca	12,00 (0,555)		
Mg	5,98 (0,276)		

* g dm^{-3} e ** mg dm^{-3} – Quantidade de nutriente aplicado no tratamento que recebeu esterco de curral no total de 10% do volume total do vaso (densidade do resíduo de 462 g dm^{-3}).

Após a incubação, as amostras foram secas e retiraram-se subamostras de 1 dm^{-3} para análises e, nos 3 dm^{-3} restantes, aplicaram-se as doses de fósforo necessárias para atingir 90% da produção máxima de feijoeiro, que corresponderam a 299, 460, 359 e 345 mg dm^{-3} de P para os solos OY, GM, GX e RU, respectivamente, de acordo com Fernandes et al. (2001). Os solos foram colocados em vasos e receberam, ainda, a aplicação de uma adubação básica com macro e micronutrientes, que forneceu: 100 mg de N, 100 mg de K, 60 mg de S, 40 mg de Mg, 160 mg de Ca, 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.. As fontes utilizadas foram: $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, KH_2PO_4 , $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, NH_4NO_3 ,

$\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ e H_3BO_3 . As amostras de solo foram novamente incubadas, com umidade próxima à capacidade de campo, por um período de 30 dias. Após essa incubação, subamostras de cada vaso foram retiradas para análise de P Melhich-1 (EMBRAPA, 1997)

Após esse período, foram semeadas diretamente em cada vaso, seis sementes de feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L., cv Carioca MG), mantendo-se a umidade dos solos próxima à capacidade de campo através de pesagens diárias dos vasos e adição de água deionizada. Aproximadamente sete dias após a emergência, foi realizado um desbaste deixando-se três plantas por vaso. As adubações em cobertura com nitrogênio e potássio foram realizadas de acordo com a necessidade das plantas, estimando-se as doses com base nos teores adequados dos mesmos na planta e na possível produção de massa vegetal. Os tratamentos que proporcionaram um crescimento normal do feijoeiro receberam 200 mg dm^{-3} de N, 140 mg dm^{-3} de K e 40 mg dm^{-3} de S por dm^{-3} , parcelados em quatro aplicações até o florescimento, através de fontes p.a.: KNO_3 , NH_4NO_3 e $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$.

Uma planta foi colhida no florescimento e seca em estufa de circulação forçada de ar, à temperatura de $65\text{-}70^\circ\text{C}$ e moída em moinho tipo Willey. Nas folhas foram determinados os teores de fósforo no tecido (P florescimento). As outras duas plantas foram colhidas na maturação fisiológica dos grãos, determinando-se a produção de matéria seca de grãos (MSGR), matéria seca da parte aérea total (MSPA) e seus respectivos teores de fósforo. Relacionando os teores de P com a MSPA e MSGR, determinou-se o P acumulado (P acum) em cada parte e, pela soma, o P acumulado na parte aérea total no final do ciclo.

Os teores de P nos tecidos da parte aérea das plantas de feijoeiro (folhas no florescimento, folhas, caule e grãos no final do ciclo) foram determinados por digestão nítroperclórica (Malavolta et al., 1997) e a leitura nos extratos foi feita por colorimetria, segundo Braga & Defelipo (1974).

Para as características estudadas, foram ajustados modelos de regressão múltipla (superfície 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 correspondem 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 às diferentes faixas de valores da variável resposta em função das variáveis explicativas. Foi utilizado o programa de análises estatísticas SAS (SAS, 1986).

A partir da relação esterco bovino e calcário, que propiciou a produção máxima de feijão, foram estimados os valores de P Mehlich-1, P florescimento, MSPA, P acumulado, correspondentes à produção máxima do feijoeiro. Esses valores e os obtidos no tratamento testemunha foram correlacionados entre si e com os atributos físicos, químicos e mineralógicos dos solos.

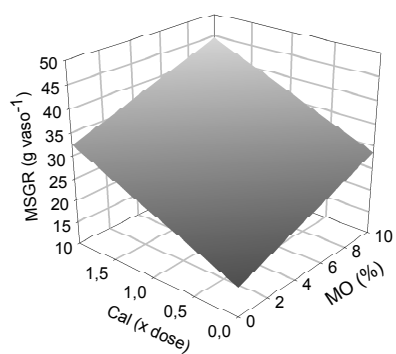
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para as características P Mehlich-1, acúmulo de P e matéria seca de grãos (MSGR) no solo OY; P Mehlich-1 no solo GM; P Mehlich-1, P florescimento, acúmulo de P, matéria seca da parte aérea (MSPA) e matéria seca de grãos (MSGR) no solo GX; P Mehlich-1, matéria seca da parte aérea (MSPA) e matéria seca de grãos (MSGR) no solo RU, a interação esterco bovino (MO) x calagem (Cal) não foi significativa (Anexos 1A, 2A, 3A e 4A).

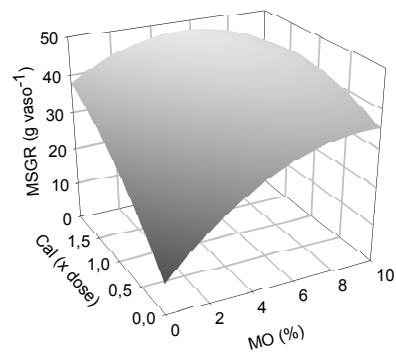
Os solos OY e GX mostraram uma tendência de aumento linear na produção de MSGR com os aumentos das doses de esterco bovino e de calcário, como mostram a Figura 1 e a Figura 2 pelos cortes horizontais sobre o espaço fatorial nas superfícies de respostas, mostrando as isoquantas correspondentes. Nesses solos, as máximas produções de MSGR foram obtidas com as maiores doses de esterco e calcário (Tabelas 3 e 4). Os solos GM e RU apresentaram uma tendência quadrática na produção de MSGR (Figuras 1 e 2) com as máximas produções obtidas em 5,6% de esterco e 2 vezes a dose de calcário e 10% de esterco e 1,73 vez a dose de calcário, respectivamente.

De acordo com Fernandes et al. (2001), a baixa produção da MSGR nestes solos se explica pela elevada acidez e altos teores de Al. O efeito negativo do Al deve-se, principalmente, à drástica redução no crescimento radicular, provocando assim uma menor absorção de nutrientes.

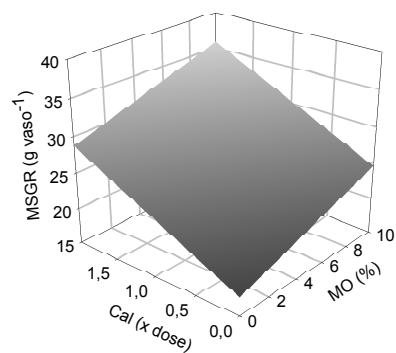
SOLO OY



SOLO GM



SOLO GX



SOLO RU

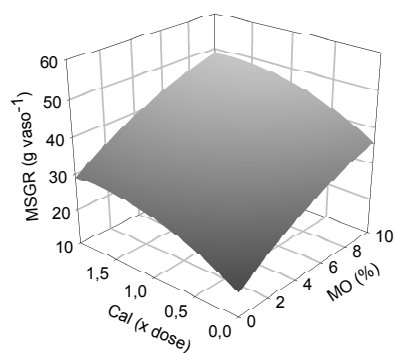


FIGURA 1 Representação gráfica da MSGR (g vaso^{-1}), em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (Cal), na forma de superfície de resposta, para os solos OY, GM, GX e RU.

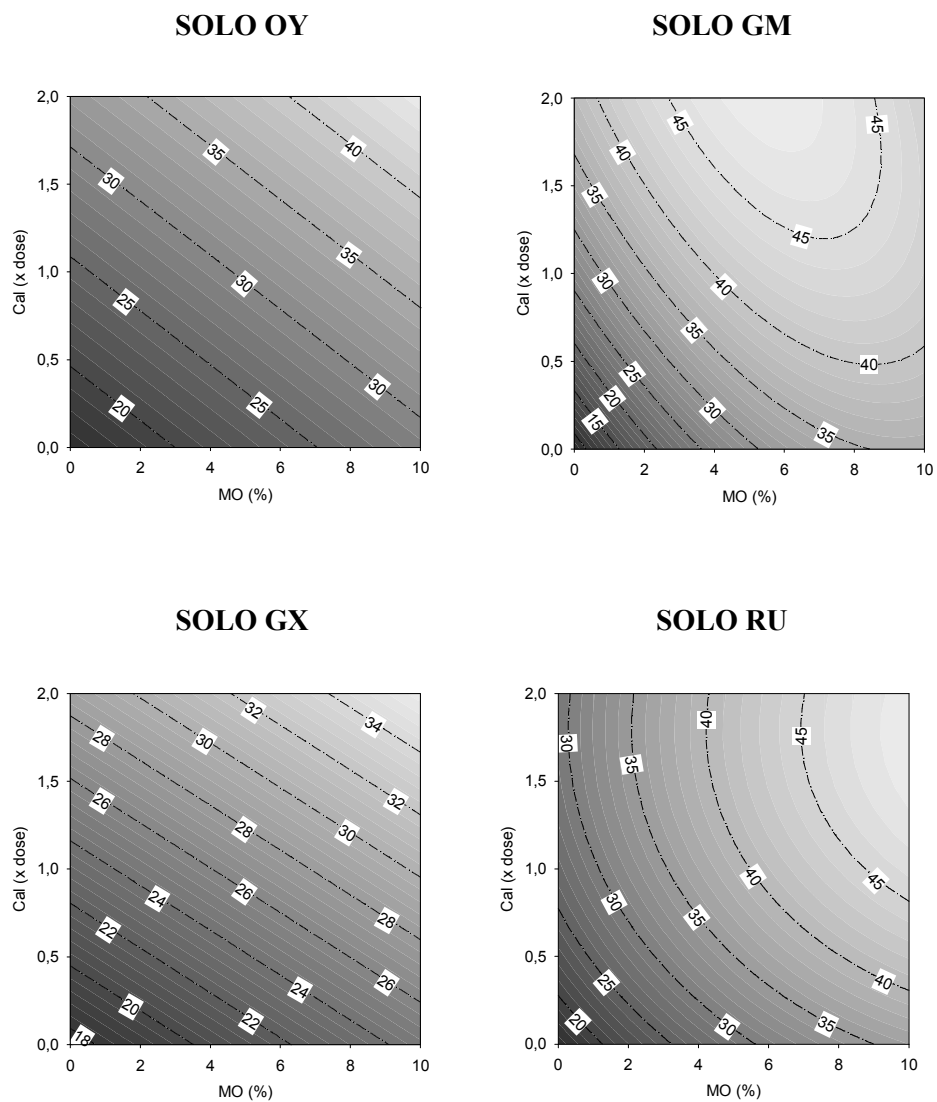


FIGURA 2 Corte horizontal sobre o espaço fatorial nas superfícies de resposta mostrando isoquantas correspondentes a diferentes faixas de valores para a MSGR (g vaso^{-1}), em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (Cal).

TABELA 3 Modelos ajustados para o MSGR (y) em função da aplicação de esterco bovino (MO) e calcário (Cal), para os solos OY, GM, GX e RU.

Solo	Modelo ajustado
OY	$y = \beta_0 + \beta_1 \text{MO} + \beta_2 \text{Cal}$
GM	$y = \beta_0 + \beta_1 \text{MO} + \beta_2 \text{Cal} + \beta_3 \text{MO}^2 + \beta_4 \text{Cal}^2 + \beta_5 \text{MO} * \text{Cal}$
GX	$y = \beta_0 + \beta_1 \text{MO} + \beta_2 \text{Cal}$
RU	$y = \beta_0 + \beta_1 \text{MO} + \beta_2 \text{Cal} + \beta_3 \text{MO}^2 + \beta_4 \text{Cal}^2$

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

Parâmetro	SOLOS			
	OY	GM	GX	RU
β_0	16,311025***	8,10822175***	17,48395***	16,35895455***
β_1	1,232175***	5,77865714***	0,71625***	3,020425***
β_2	7,99554286***	21,8759961***	5,61591429***	14,26729545***
β_3		-0,30713571***		-0,10545***
β_4		-3,48536364***		-3,97559091***
β_5		-1,15934286***		
R^2	79,28 %	88,78 %	87,29 %	96,08 %
Max.	44,62	47,66	35,87	48,80
(MO; Cal)	(10,00; 2,00)	(5,60; 2,00)	(10,00; 2,00)	(10,00; 1,73)

*** Significativo a 0,1%

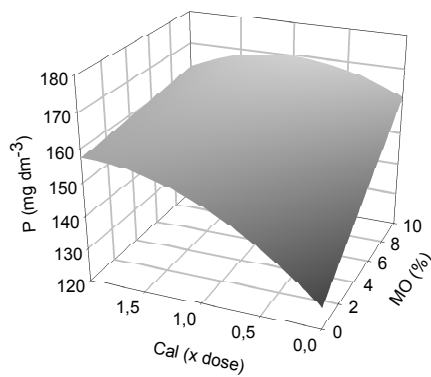
Para a variável P Mehlich-1, houve aumento dos valores com as aplicações de esterco bovino e calcário. Os solos GX e RU apresentaram uma tendência linear, enquanto que os solos OY e GM apresentaram uma tendência

quadrática, como pode ser observado pelos cortes horizontais sobre o espaço fatorial nas superfícies de respostas mostrando as isoquantas correspondentes (Figuras 3 e 4; Tabelas 5 e 6). Os maiores valores de P Mehlich-1 para esses solos foram verificados com 10% do resíduo orgânico e 1,06 e 1,87 vez a dose de calcário recomendada para os solos OY e GM, respectivamente.

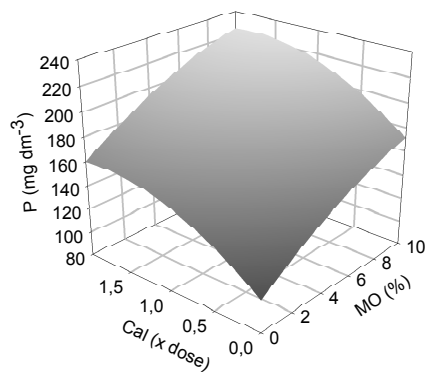
O aumento dos valores de P Mehlich-1 com o aumento das doses de resíduo orgânico ocorreu devido, principalmente, à diminuição da capacidade de adsorção de P, ao aumento de pH e à diminuição do Al trocável, como será discutido posteriormente (Andrade, Fernandes e Faquin, 2003), ao bloqueio dos sítios de adsorção de P (Hue, 1991) e liberação de cálcio e magnésio pela mineralização do esterco, formando complexos solúveis com o P. O aumento dos valores de P Mehlich-1 com as doses de calcário foi devido, principalmente, ao aumento do pH que reduz os teores de Fe e Al trocáveis por meio da precipitação destas formas, reduzindo, assim, o potencial de precipitação dos fosfatos.

Apesar das doses de P aplicadas serem bem superiores nos solos com maior CMAP (Tabela 1), os seus teores nos solos pelo extrator Mehlich-1 tiveram um comportamento inverso, isto é, os solos com menor CMAP apresentaram os maiores valores (Figuras 3, 4 e Tabela 6). Isto se deve, principalmente, à maior presença das frações de óxidos de Fe e Al com menor grau de cristalinidade nestes solos (Guilherme et al., 2000 e Fernandes, 1999). Berton, Pratt e Frankenger Jr. (1997) observaram que o Mehlich-1 foi um dos métodos mais indicados para prever a disponibilidade de P para a cultura do milho em um experimento com amostras de solo Aluvial incubado com quantidades crescentes de materiais orgânicos (palha de cevada, parte aérea de feijão-caupi, esterco bovino e lodo de esgoto).

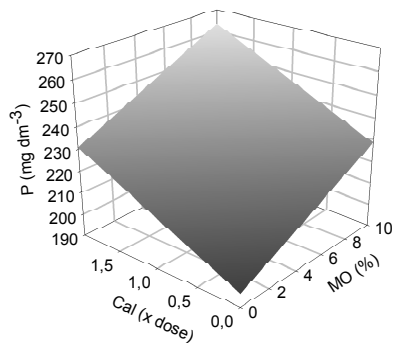
SOLO OY



SOLO GM



SOLO GX



SOLO RU

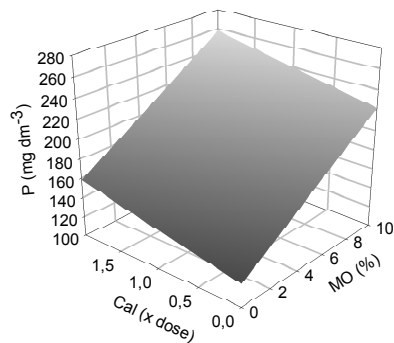


FIGURA 3 Representação gráfica do P Mehlich-1 (mg dm^{-3}), em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (Cal), na forma de superfície de resposta, para os solos OY, GM, GX e RU.

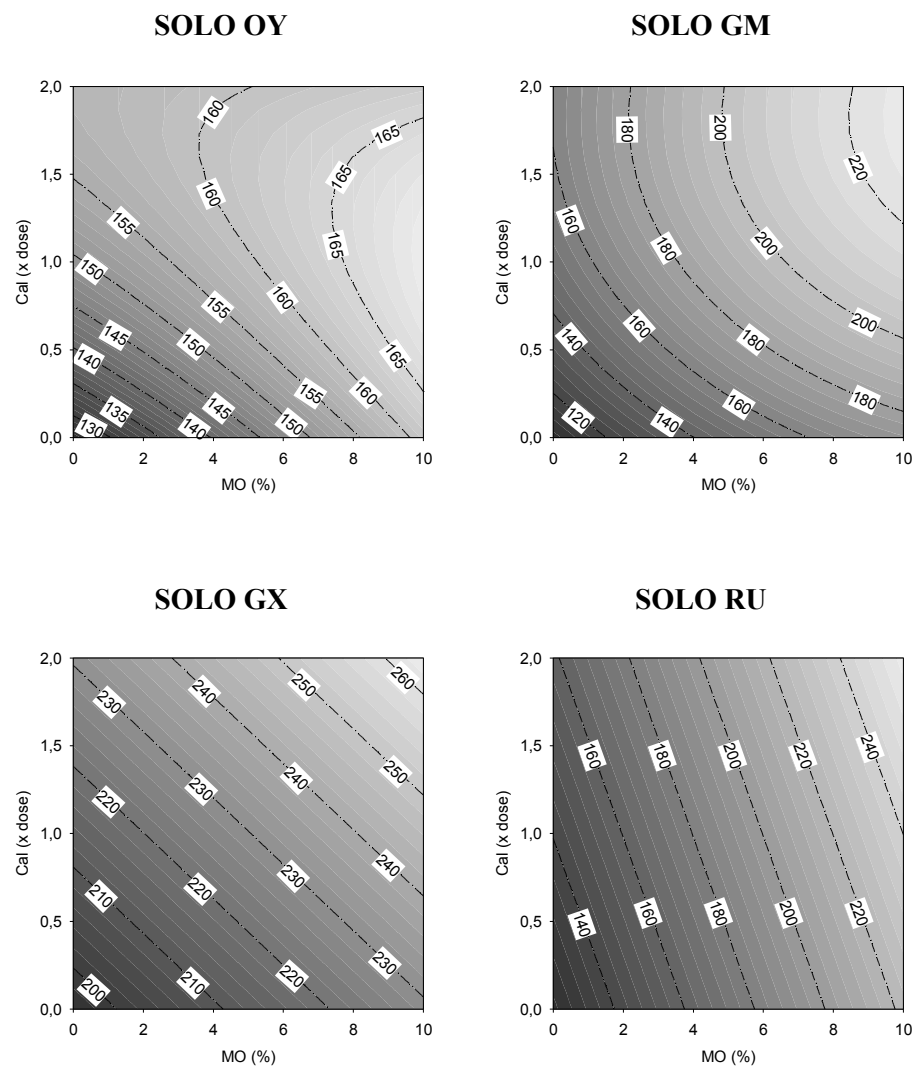


FIGURA 4 Corte horizontal sobre o espaço fatorial nas superfícies de resposta mostrando isoquantas correspondentes a diferentes faixas de valores para o P Mehlich-1 (mg dm^{-3}), em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (Cal).

TABELA 5 Modelos ajustados para o P Mehlich-1 (y), em função da aplicação de esterco bovino (MO) e calcário (Cal), para os solos OY, GM, GX e RU.

Solo	Modelo ajustado
OY	$y = \beta_0 + \beta_1 \text{MO} + \beta_2 \text{Cal} + \beta_3 \text{Cal}^2 + \beta_4 \text{MO} * \text{Cal}$
GM	$y = \beta_0 + \beta_1 \text{MO} + \beta_2 \text{Cal} + \beta_3 \text{MO}^2 + \beta_4 \text{Cal}^2$
GX	$y = \beta_0 + \beta_1 \text{MO} + \beta_2 \text{Cal}$
RU	$y = \beta_0 + \beta_1 \text{MO} + \beta_2 \text{Cal}$

TABELA 6 Estimativa dos parâmetros, significância e coeficientes de determinação (R^2) dos modelos ajustados apresentados na Tabela 5 e valores máximos para o P Mehlich-1 e quantidades ótimas de esterco bovino (MO) e calcário (Cal), em cada solo.

Parâmetro	SOLOS			
	OY	GM	GX	RU
β_0	126,3060955***	105,9687682***	195,94595***	122,6935***
β_1	3,50562***	9,76085***	3,28615***	9,9637***
β_2	30,7815045***	59,8793818***	17,3959143***	17,8285714***
β_3	-7,6344091***	-0,321***		
β_4	-1,48028***	-16,4303636***		
R^2	92,03 %	96,44 %	88,61 %	92,49 %
Max.	169,66	226,00	263,59	257,98
(MO; Cal)	(10,00; 1,06)	(10,00; 1,87)	(10,00; 2,00)	(10,00; 2,00)

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

A adição de esterco bovino e calcário afetou significativamente os teores de P foliar no florescimento do feijoeiro em todos os solos (Figuras 5 e 6; Tabelas 7 e 8). Para o solo GX, os maiores teores de P no florescimento foram obtidos com a maior dose de calcário e esterco bovino e, para os solos OY e

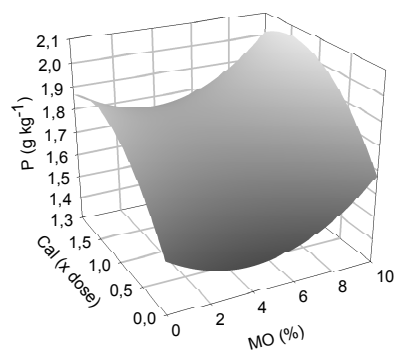
GM, foi com a maior dose de resíduo e 1,33 e 1,47 vez a dose de calcário, respectivamente. Para o solo RU, houve aumento no teor de P no florescimento até a dose de 6,8% de esterco e 1,2 vez a dose de calcário, a partir da qual houve decréscimos de esterco no teor de P foliar no florescimento.

Observa-se que, no solo GX com menor CMAP (Tabela 1), o teor de P na folha no florescimento foi maior. Segundo Novais & Smyth (1999) a maior ou menor competição entre as plantas e o solo pelo P aplicado fazem com que a planta se ajuste para utilizar o P que lhe é colocado à disposição.

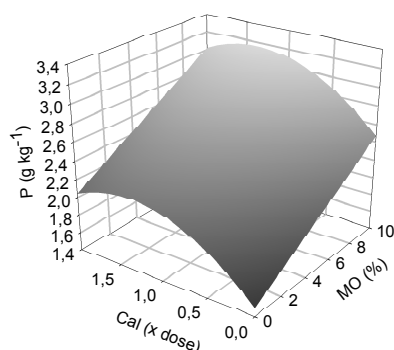
A adição de esterco bovino e calcário afetou significativamente o acúmulo de matéria seca da parte aérea (MSPA) em todos os solos (Figuras 7 e 8; Tabelas 9 e 10). O maior valor de MSPA para o solo OY foi obtido com a maior dose de esterco bovino e calcário, para o GM com 7,0% de esterco e duas vezes a dose de calcário; para o GX com 10% de esterco bovino e duas vezes a dose de calcário e para o RU com 10% de esterco bovino e 1,73 vez a dose de calcário.

Para os quatro solos, houve aumento no acúmulo de P (P acum) na matéria seca da parte aérea total do feijoeiro, com o aumento das doses de esterco e de calcário (Figuras 9 e 10; Tabelas 11 e 12). Para os solos OY, GM e RU, o maior acúmulo de P ocorreu com as maiores doses de esterco bovino e de calcário. Para o solo GX, o maior acúmulo de P ocorreu com 8,4% de esterco e com a maior dose de calcário.

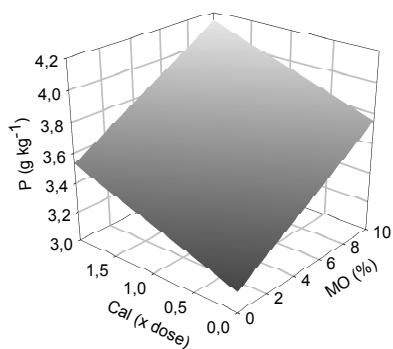
SOLO OY



SOLO GM



SOLO GX



SOLO RU

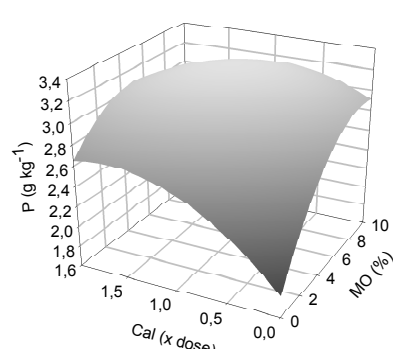


FIGURA 5 Representação gráfica do P foliar no florescimento (g kg^{-1}), em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (Cal), na forma de superfície de resposta, para os solos OY, GM, GX e RU.

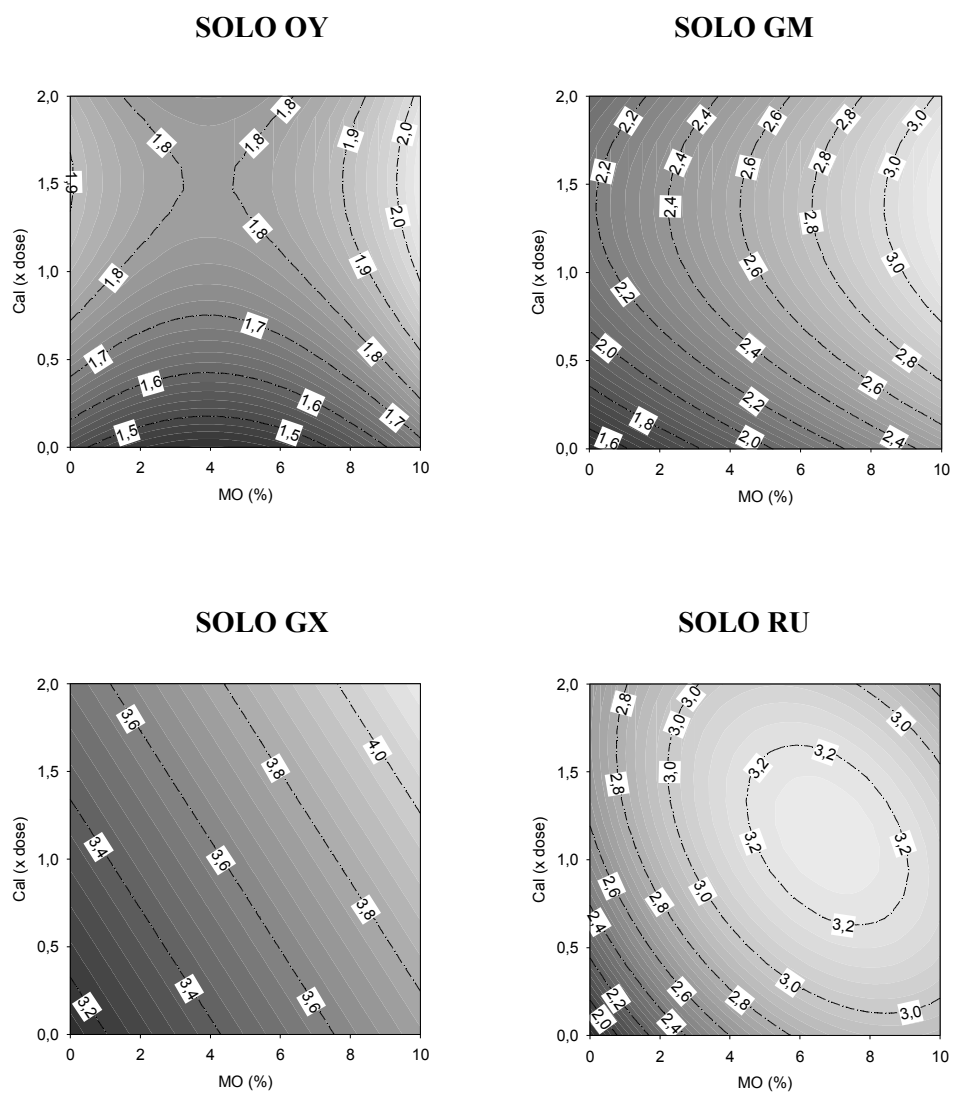


FIGURA 6 Corte horizontal sobre o espaço fatorial nas superfícies de resposta, mostrando isoquantas correspondentes a diferentes faixas de valores para o P florescimento (g kg^{-1}), em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (Cal).

TABELA 7 Modelos ajustados para o P florescimento (y), em função da aplicação de esterco bovino (MO) e calcário (Cal), para os solos OY, GM, GX e RU.

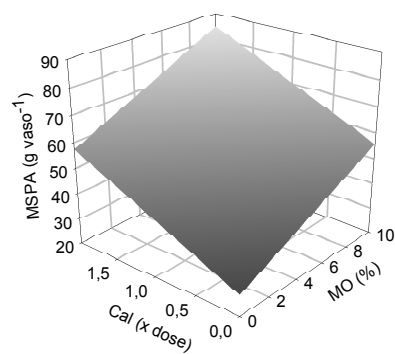
Solo	Modelo ajustado
OY	$y = \beta_0 + \beta_1 \text{MO} + \beta_2 \text{Cal} + \beta_3 \text{MO}^2 + \beta_4 \text{Cal}^2$
GM	$y = \beta_0 + \beta_1 \text{MO} + \beta_2 \text{Cal} + \beta_3 \text{Cal}^2$
GX	$y = \beta_0 + \beta_1 \text{MO} + \beta_2 \text{Cal}$
RU	$y = \beta_0 + \beta_1 \text{MO} + \beta_2 \text{Cal} + \beta_3 \text{MO}^2 + \beta_4 \text{Cal}^2 + \beta_5 \text{MO} * \text{Cal}$

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

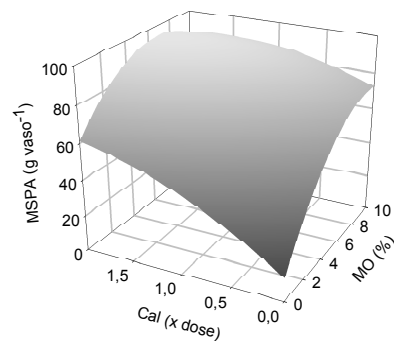
Parâmetro	SOLOS			
	OY	GM	GX	RU
β_0	1,525513636***	1,491511364***	3,135375***	1,806547403***
β_1	-0,05505*	0,097775***	0,061625***	0,258845714***
β_2	0,501036364***	1,002113636***	0,197***	1,026745455***
β_3	0,007**	-0,36322727***		-0,01492857***
β_4	-0,16527272***			-0,30309090***
β_5				0,04944***
R^2	48,39%	77,60%	50,02%	84,35%
Max.	2,05	3,16	4,14	3,26
(MO; Cal)	(10,00; 1,47)	(10,00; 1,33)	(10,00; 2,00)	(6,80; 1,20)

***, **, * Significativo a 0,1%, 1% e 5%, respectivamente

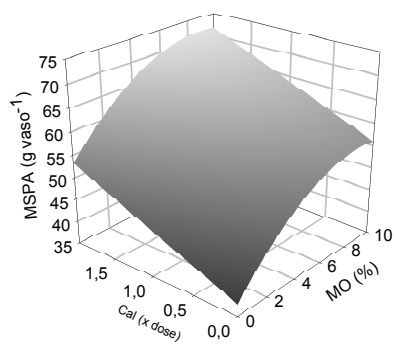
SOLO OY



SOLO GM



SOLO GX



SOLO RU

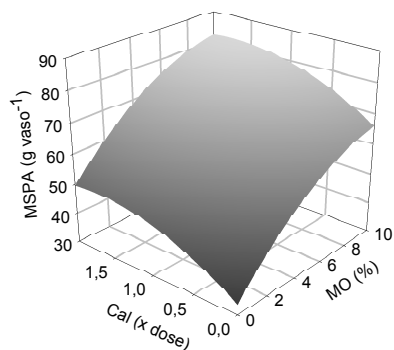


FIGURA 7 Representação gráfica da MSPA (g vaso⁻¹), em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (Cal), na forma de superfície de resposta, para os solos OY, GM, GX e RU.

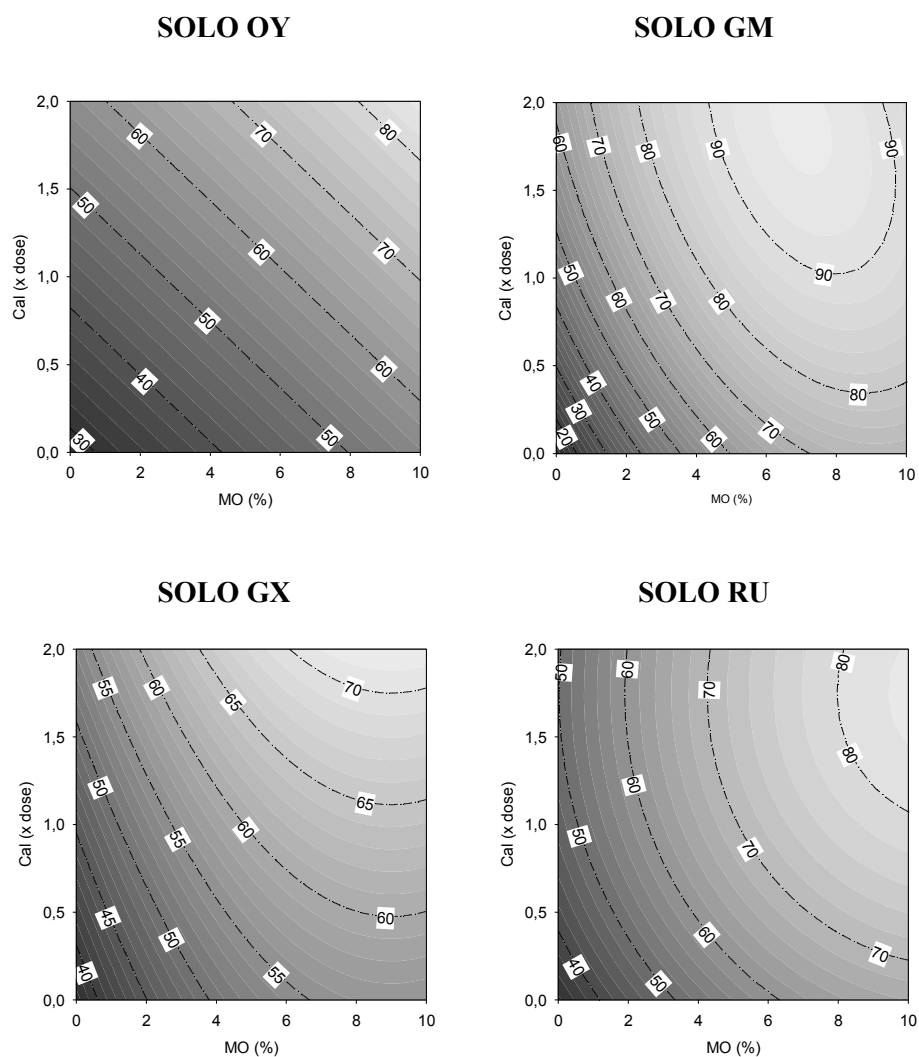


FIGURA 8 Corte horizontal sobre o espaço fatorial nas superfícies de resposta mostrando isoquantas correspondentes a diferentes faixas de valores para o MSPA (g vaso⁻¹), em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (Cal).

TABELA 9 Modelos ajustados para o MSPA (y) em função da aplicação de esterco bovino (MO) e calcário (Cal), para os solos OY, GM, GX e RU.

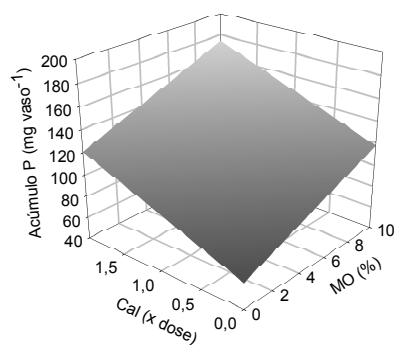
Solo	Modelo ajustado
OY	$y = \beta_0 + \beta_1 \text{MO} + \beta_2 \text{Cal}$
GM	$y = \beta_0 + \beta_1 \text{MO} + \beta_2 \text{Cal} + \beta_3 \text{MO}^2 + \beta_4 \text{Cal}^2 + \beta_5 \text{MO} * \text{Cal}$
GX	$y = \beta_0 + \beta_1 \text{MO} + \beta_2 \text{Cal} + \beta_3 \text{MO}^2$
RU	$y = \beta_0 + \beta_1 \text{MO} + \beta_2 \text{Cal} + \beta_3 \text{MO}^2 + \beta_4 \text{Cal}^2$

TABELA 10 Estimativa dos parâmetros, significância e coeficientes de determinação (R^2) dos modelos ajustados apresentados na Tabela 9, e valores máximos para o MSPA e quantidades ótimas de esterco bovino (MO) e calcário (Cal), em cada solo.

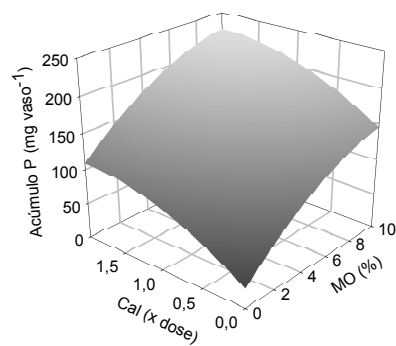
Parâmetro	SOLOS			
	OY	GM	GX	RU
β_0	28,00445***	12,62002727***	37,52777143***	33,44120195***
β_1	2,77375***	13,06826***	4,16109286***	5,82381071***
β_2	14,5892***	38,69110844***	7,84377143***	18,74524091***
β_3		-0,7103***	-0,23101429***	-0,25637857***
β_4		-7,19704545***		-5,34268182***
β_5		-1,67869714***		
R^2	82,64%	91,12%	86,76%	95,11%
Max.	84,92	94,50	71,95	82,48
(MO; Cal)	(10,00; 2,00)	(7,00; 1,87)	(9,00; 2,00)	(10,00; 1,73)

*** Significativo a 0,1%

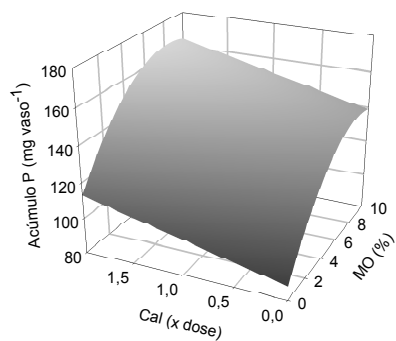
SOLO OY



SOLO GM



SOLO GX



SOLO RU

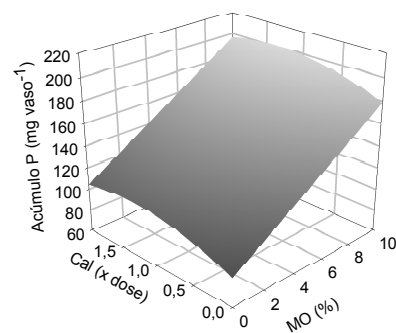


FIGURA 9 Representação gráfica do acúmulo de P (mg vaso^{-1}) na parte aérea total do feijoeiro, em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (Cal), na forma de superfície de resposta, para os solos OY, GM, GX e RU.

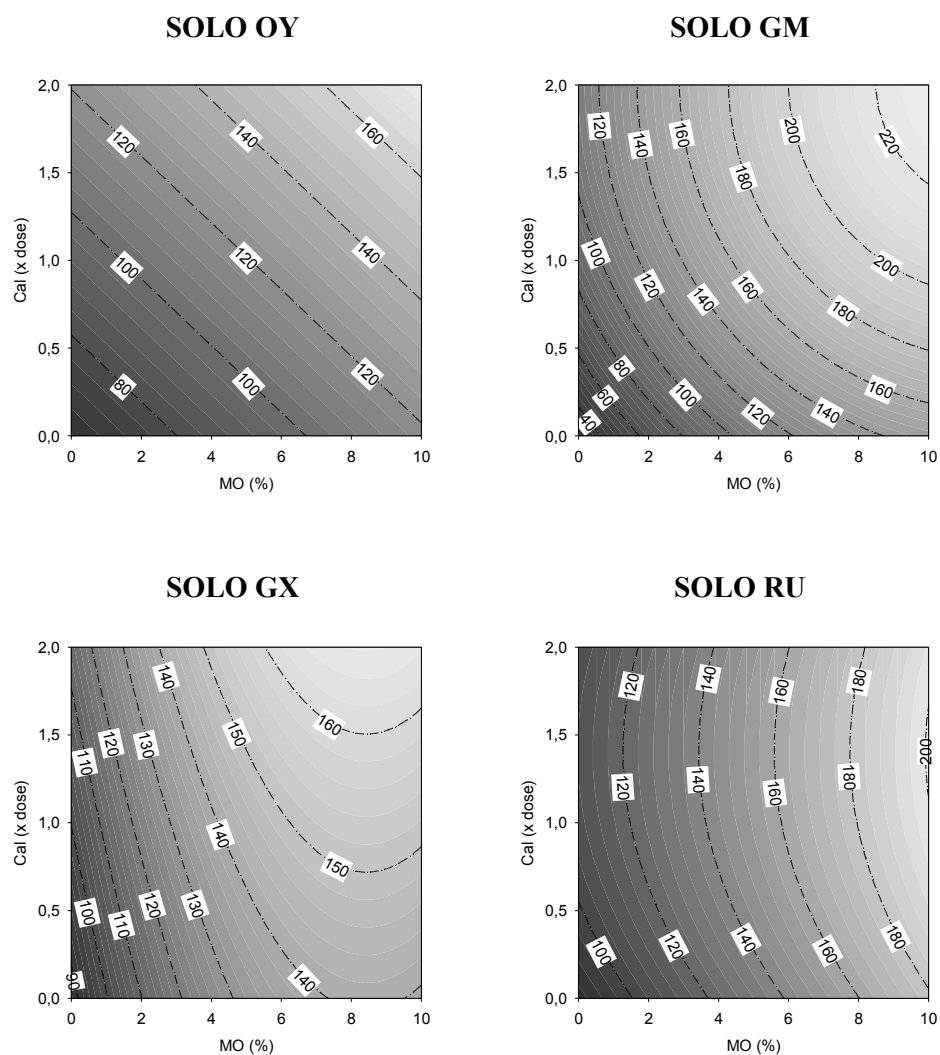


FIGURA 10 Corte horizontal sobre o espaço fatorial nas superfícies de resposta, mostrando isoquantas correspondentes a diferentes faixas de valores para o acúmulo P (mg vaso⁻¹), em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (Cal).

TABELA 11 Modelos ajustados para o acúmulo P (y), em função da aplicação de esterco bovino (MO) e calcário (Cal), para os solos OY, GM, GX e RU.

Solo	Modelo ajustado
OY	$y = \beta_0 + \beta_1 \text{MO} + \beta_2 \text{Cal}$
GM	$y = \beta_0 + \beta_1 \text{MO} + \beta_2 \text{Cal} + \beta_3 \text{MO}^2 + \beta_4 \text{Cal}^2$
GX	$y = \beta_0 + \beta_1 \text{MO} + \beta_2 \text{Cal} + \beta_3 \text{MO}^2$
RU	$y = \beta_0 + \beta_1 \text{MO} + \beta_2 \text{Cal} + \beta_3 \text{Cal}^2$

TABELA 12 Estimativa dos parâmetros, significância e coeficientes de determinação (R^2) dos modelos ajustados apresentados na Tabela 11, e valores máximos para o acúmulo P e quantidades ótimas de esterco bovino (MO) e calcário (Cal), em cada solo.

Parâmetro	SOLOS			
	OY	GM	GX	RU
β_0	63,612675***	27,30934221***	87,5393***	85,743525***
β_1	5,430725*	20,30783212***	12,656575***	9,257625***
β_2	28,54094286***	79,73268636***	12,6908***	32,09365***
β_3		-0,84553571***	-0,75065***	-11,4275***
β_4		-19,5327727***		
R^2	92,59%	93,61%	89,38%	84,86%
Max.	175,00	227,16	166,27	200,80
(MO; Cal)	(10,00; 2,00)	(10,00; 2,00)	(8,40; 2,00)	(10,00; 1,46)

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

De modo geral, o aumento das doses de esterco bovino e de calcário contribuiu para a nutrição fosfatada do feijoeiro e para o crescimento da produção. Além da crescente disponibilidade de fósforo, outra maneira pela qual os resíduos orgânicos podem influenciar a nutrição fosfatada é por meio da

presença de ácidos húmicos, formados durante a decomposição da matéria orgânica. Estes ácidos podem provocar mudanças no número de raízes secundárias em algumas plantas, fazendo com que uma maior quantidade de solo seja explorada (Canelas et al., 2002). Com isso, há maior aproveitamento do P, que se move no solo por difusão a curtas distâncias.

Os maiores aumentos de MSPA, Pflo, MSGR e P acum foram para o solo GM. Este solo apresenta > MOS > argila > Fe_o > CMAP < P rem > Gb (Tabela 1), em relação aos demais solos estudados. Por outro lado, o solo GX apresenta < MOS < argila < Fe_o < CMAP > P rem e < Gb, evidenciando o efeito dos tratamentos nos atributos químicos do solo e na nutrição e produção do feijoeiro (Tabela 13).

TABELA 13 Valores de P Mehlich-1, MSPA, P florescimento e P acumulado em relação à produção máxima.

	P Mehlich-1 (mg dm ⁻³)	MSPA (g vaso ⁻¹)	P flo (g kg ⁻¹)	MSGR (g vaso ⁻¹)	P acum (mg vaso ⁻¹)
OY	162,7 (84,9) ¹	84,9 (203,3)	2,02 (32,0)	44,6 (173,6)	175,0 (175,1)
GM	204,6 (93,1)	93,3 (639,5)	2,59 (73,8)	47,7 (487,8)	204,9 (650,4)
GX	263,6 (34,5)	71,7 (91,1)	4,14 (32,3)	35,9 (105,2)	164,4 (87,8)
RU	253,2 (106,4)	82,5 (146,7)	2,91 (61,7)	48,8 (198,3)	199,6 (132,8)

¹ Valores entre parênteses representam percentual de aumento em relação à testemunha.

Quando se correlacionaram os valores das produções de MSGR e o P acumulado dos quatro solos no tratamento testemunha (dose zero de esterco e calcário) e os valores correspondentes à produção máxima, com alguns atributos dos solos (Tabela 14), verificou-se, para a testemunha, a correlação significativa e negativa com a matéria orgânica e Fe oxalato, devido à menor disponibilidade

de P pela maior capacidade de adsorção de P (CMAP) nestas condições (Tabela 1), conforme observado por Guilherme et al. (2000), para solos de várzea.

TABELA 14 Coeficientes de correlação linear simples entre a produção (MSGR) e P acumulado (Pacum) com alguns atributos dos solos.

	Argila	Areia	Mat. org.	Teor de gibbsita	Ferro oxalato
Testemunha					
MSGR	-0,70 ^{ns}	0,50 ^{ns}	-0,97**	-0,58 ^{ns}	-0,84 *
P acum	-0,76 ⁰	0,67 ^{ns}	-0,97**	-0,64 ^{ns}	-0,81 ⁰
Máxima produção					
MSGR	0,89*	-0,79*	0,34 ^{ns}	0,94**	0,88*
P acum	0,77 ⁰	-0,55 ^{ns}	0,55 ^{ns}	0,90**	0,77 ⁰

**, *, ⁰, ^{ns}, significativo a 1%, 5%, 10% e não significativo, respectivamente.

Com a aplicação de calcário e esterco bovino, a MSGR correlacionou-se positivamente com o teor de argila, teor de gibbsita e Fe oxalato (Tabela 14). Este resultado pode ser entendido como uma redução no efeito negativo destes atributos na nutrição P e na produção do feijoeiro. Além disso, a maior capacidade de suprimento do P pelos solos com maior teor de argila teve um melhor aproveitamento do nutriente pela cultura ao longo do seu ciclo (Fernandes et al., 2002), ou seja, quando não se fez correção, os solos com menor CMAP produziram mais.

A correlação entre o P Mehlich-1 e P florescimento foi positiva na testemunha e na máxima produção, evidenciando que o extrator Mehlich-1 foi supostamente capaz de prever a disponibilidade de P para as plantas. A

correlação negativa entre a MSPA e P florescimento, e MSGR e P florescimento, na máxima produção, evidencia que houve maior MSPA e MSGR com menor teor foliar de P no florescimento, destacando a importância de se considerar o efeito tampão dos solos nas recomendações de fósforo (Tabela 15). Outra correlação importante observada foi entre o P acum e MSGR; e P acum e MSGR tanto na testemunha como na máxima produção, evidenciando a importância da disponibilidade do P na produção de grãos e matéria seca.

TABELA 15 Coeficientes de correlação linear simples entre os valores de P Mehlich-1, matéria seca da parte aérea (MSPA), P foliar no florescimento (P flo), matéria seca de grãos (MSGR) e P acumulado na parte aérea (P acum), no tratamento testemunha e os correspondentes à produção máxima nos quatro solos.

	P Meh	MSPA	P flo	MSGR	P acum
Testemunha					
PMeh	1				
MSPA	0,74 ⁰	1			
Pflo	0,97**	0,69 ^{ns}	1		
MSGR	0,63 ^{ns}	0,96**	0,53 ^{ns}	1	
P acum	0,66 ^{ns}	0,98**	0,63 ^{ns}	0,94**	1
Máxima produção					
PMeh	1				
MSPA	-0,62 ^{ns}	1			
Pflo	0,87*	-0,79 ⁰	1		
MSGR	-0,35 ^{ns}	0,82*	-0,74 ⁰	1	
P acum	-0,05 ^{ns}	0,79 ⁰	-0,44 ^{ns}	0,89**	1

**, *, ⁰, ^{ns}; significativo a 1%, 5%, 10% e não significativo, respectivamente.

4 CONCLUSÕES

A adição de esterco bovino e calcário, em todos os solos de várzea estudados, aumentou a disponibilidade do P pelo Mehlich-1 e, com isso, aumentou também o P foliar, o P acumulado, a MSPA e a MSGR do feijoeiro, variando entre os solos a magnitude das respostas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ALVAREZ V., V.H.; FONSECA, D.M. Definição de doses de fósforo para determinação da capacidade máxima de adsorção de fosfatos e para ensaios em casa de vegetação. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Campinas, n.1, v.14, p.49-55, jan./abr. 1990.

ALVAREZ V., V.H.; NOVAIS, R.F. de; DIAS, L.E.; OLIVEIRA, J.A. de; Determinação e uso do fósforo remanescente. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, n.1, v.25, p.27-32, jan./mar. 2000.

ANDRADE, A. T.; FERNANDES, L. A.; FAQUIN, V. Organic residue, limestone, gypsum, and phosphorus adsorption by lowland soils. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, n.2, v.59, p. 349-355, abr./jun., 2003.

ANDRADE, C.A.B. DE; FAQUIN, V.; FURTINI NETO, A.E.; CURI, N.; VEIGA, P.M.R. da; ANDRADE, M.J.B. de. Fertilidade de solos de várzea do Sul de Minas Gerais para o cultivo do feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 11, p. 2287-2294, nov. 2000.

AZEVEDO, W.R. de. **Níveis críticos de boro em rabanete cultivado em solos de várzea do sul de Minas Gerais**. Lavras, 1999. 53p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Lavras.

BRAGA, J.M. & DEFELIPO, B.V. Determinação espectrofotométrica de fósforo em extratos de solo e material vegetal. **Revista Ceres**, Viçosa, n.113, v.21, p.73-85, 1974.

BERTON, R.S.; PRATT, P.F.; FRANKENBERGER Jr., W.T. Phosphorus availability in soils amended with organic materials, estimated by three chemical methods and two enzyme activities. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, n.4, v. 21, p. 617-624, out./dez. 1997.

EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solo. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro, Ministério da agricultura, 1997. 212p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412p.

FAGERIA, N.K.; BARBOSA FILHO, M.P.; STONE, L.F. Nutrição de fósforo na produção do feijoeiro. In.: Yamada, T; Abdalla, S. R. S. e; **Anais do simpósio sobre fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba:POTAFOS, p. 435-456. 2004.

FERNANDES, L.A. **Formas de alumínio, de fósforo e fosfatase ácida em solos de várzea cultivados com feijoeiro: influência de calagem e fósforo**. Lavras, 1999. 111p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Lavras.

FERNANDES, L. A.; FAQUIN, V.; ANDRADE, A. T.; OLIVEIRA JUNIOR, A. C. DE; FURTINI NETO, A. E.; CURI, N. Produção e níveis críticos de fósforo do feijoeiro cultivado em solos de várzea. **Ciência & Agrotecnologia**, Lavras, n.5, v. 25 p. 1133-1141, set./out. 2001.

GUILHERME, L.R.G.; CURI, N.; SILVA, M.L.N.; RENÓ, 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.

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

JUNQUEIRA, A.D. de A. **Diagnóstico e correção da fertilidade de um solo de várzea do Sul de Minas Gerais para a cultura do feijoeiro**. Lavras, 2001. 82 p. (Dissertação – Mestrado) – Universidade Federal de Lavras.

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

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A.de. **Avaliação do estado nutricional das plantas - princípios e aplicações**. Piracicaba: Potafos, 1997. 210p.

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**, Clarkson, v.3, p. 317-327, 1960.

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

SAS® Instituto Inc., SAS/STAT® User's Guide, Version 6, Fourth Edition, Volume 2, Cary, NC: SAS Institute Inc., 1989, 846p.

TEDESCO, M.J.; GIANELO, C.; BIASSANI, C.A.; BOHEN, H.; VOLKWEIS, S.J. **Análise do solo, planta e outros materiais**. Porto Alegre: Departamento de Solos/UFRGS, 1995, 174 p.

WILLETT, I.R. Phosphorus dynamics in relation to redox processes in flooded soils. **INTERNATION CONGRESS IN SOIL SCIENCE**, 13, Hamburg, 6:748-755, 1986.

CAPÍTULO III
CALAGEM E ESTERCO BOVINO NA ADSORÇÃO DE FÓSFORO EM
SOLOS DE VÁRZEA

RESUMO

ANDRADE, Alex Teixeira. Calagem e esterco bovino na adsorção de fósforo nos solos de várzea. In: **_____Dinâmica do fósforo em solos de várzea cultivados com feijoeiro sob influência da calagem e adubação orgânica.** 2005 117p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.¹

O presente estudo foi conduzido em casa de vegetação do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras, com o objetivo de verificar os efeitos das doses de esterco bovino e calcário sobre parâmetros de adsorção de fósforo em quatro solos de várzea e suas relações com a nutrição fosfatada e produção do feijoeiro. Conduziram-se quatro experimentos com os solos Organossolo Mésico (OY), Gleissolo Melânico (GM), Gleissolo Háptico (GX) e Neossolo Flúvico (RU), em vasos contendo 3dm³. Foi utilizado o delineamento 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; 0,5; 1 e 2 vezes a dose recomendada para atingir V=70%) nos quais foram cultivadas três plantas de feijoeiro. Após a aplicação dos tratamentos e incubação por 60 dias, com a umidade na capacidade de campo, foram avaliados fósforo remanescente (P-rem), capacidade máxima de adsorção de P (CMAP), índice tampão de P (ITP), pH e Al trocável. Os resultados mostraram que a aplicação de calcário e esterco bovino alterou a capacidade de adsorção de P, diminuindo a CMAP e o Al trocável e aumentando P rem e o pH, contribuindo para um melhor aproveitamento de P e aumento da produção de feijoeiro.

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

ABSTRACT

ANDRADE, Alex Teixeira. Liming and bovine manure in phosphorus adsorption in lowland soils. In _____ **Phosphorus dynamics in lowland soils cultivated with beans under influence of liming and organic fertilization**. 2005. 117p. Thesis (Doctorate in Soils and Plant Nutrition) – Federal University of Lavras, Lavras, MG.

The present study was conducted in greenhouse in the Soil Science Department of the Federal University of Lavras with the purpose of verifying the effects of the doses of bovine manure and limestone on the parameters of P adsorption in four lowland soils and their relationships with phosphate nutrition and bean plant production. Four experiments with the soils Mesic Organosol (OY), Melanic Gleysol (GM), Haplic Gleysol (GX) and Fluvisol (RU) were conducted in pots containing 3 dm³. The completely randomized design in 4x5 factorial scheme with four replicates, the treatments consisting of 5 doses of bovine manure (0%; 0.5%; 5.0%; 7.5% and 10% of the total volume of soil) and 4 doses of limestone (0; 0.5; 1 and 2 times the dose recommended to reach V=70%), in which three bean plants were cultivated. After application of the treatments and incubation for 60 days, with moisture at the field capacity, remaining phosphorus (P-rem), maximum capacity of P adsorption (CMAP), buffer index of P (ITP), pH, exchangeable Al were evaluated. The results showed that limestone and bovine manure application altered the P adsorption capacity, decreasing the CMAP and exchangeable Al and increasing P rem and pH contributing toward a better use of P and increase of bean plant yield.

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

1 INTRODUÇÃO

Os solos de várzea possuem características químicas e físicas que são influenciadas principalmente pelos ciclos de umedecimento e secagem. Em condições de inundação dos solos de várzea ocorre um aumento na concentração de fósforo solúvel em água e na disponibilidade de P (Guilherme, 1990).

Embora seja amplamente relatado o aumento na disponibilidade de fósforo com a inundação, esta situação se reverte completamente com a drenagem posterior do solo causando sérios problemas nutricionais para as culturas subseqüentes (Brandon & Mikkelsen, 1979, 1983). Willett (1986) observou deficiência de fósforo para o milho cultivado após arroz inundado e, assim, sugeriu que esta deficiência estava mais relacionada à forte adsorção de P pelo solo drenado.

Segundo Alva et al. (1980), a reoxidação do ferro durante o período de secagem resulta no aumento da reatividade das frações de óxidos do solo, levando ao aumento da capacidade de adsorção do fósforo nos solos de várzea.

Uma alternativa para a redução desta adsorção de P pelos solos de várzea é a aplicação de um resíduo orgânico e calcário, sendo esta redução atribuída à elevação do pH e à redução dos teores de Al trocável nestes solos (Andrade, Fernandes e Faquin, 2003). A redução dos teores de Al trocável deve-se à complexação com os ácidos orgânicos produzidos pela decomposição da matéria orgânica e, além disso, a redução na adsorção de P ocorre devido à competição dos ácidos orgânicos pelos sítios de fixação de P (Hue, 1991).

Portanto, este trabalho teve por objetivo verificar os efeitos das doses de esterco bovino e calcário sobre parâmetros de adsorção de fósforo em quatro solos de várzea e suas relações com a nutrição fosfatada e produção do feijoeiro.

2 MATERIAL E MÉTODOS

A descrição e as características 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 a aplicação dos tratamentos com esterco bovino e calcário nas amostras de 4dm dos solos e incubados por 60 dias, foram retiradas subamostras (1dm) para a determinação da adsorção de fósforo.

O pH em água foi determinado na relação solo:solução 1:2,5 e o Al trocável extraído por KCl 1mol L⁻¹ (EMBRAPA, 1997).

O P rem foi determinado na solução de equilíbrio solo-solução, obtida pela agitação de 5cm³ de TFSA com 50ml de uma solução de CaCl₂ 10mmol L⁻¹ contendo 60mg 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).

Para a determinação da capacidade máxima de adsorção de fósforo, as doses de fósforo foram definidas de acordo com os valores de P-rem, sendo 0,0; 0,1; 0,25; 0,45; 0,70 e 1,00 vez a maior dose, conforme sugerido por Alvarez V. (1990). Em cada amostra de 2,5cm³ de TFSA, foram adicionados 25mL de solução de CaCl₂ 10mmol L⁻¹ contendo P nas doses indicadas e, em seguida, agitadas por 24 horas. Após esse período, a mistura solo-solução foi centrifugada e filtrada, e 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 o P adsorvido. Os valores de fósforo adsorvido foram, então, ajustados à equação de Langmuir para estimar a CMAP (Syers et al., 1973; Rajan & Fox, 1975), conforme a seguinte expressão:

$$q = (kbC) / (1 + kC)$$

em que: q = fósforo adsorvido (mg dm^{-3})

k = constante relacionada com a energia de ligação do P (L mg^{-1})

b = CMAP do solo (mg dm^{-3})

C = concentração de equilíbrio (mg dm^{-3})

Nas mesmas amostras de solo, após a centrifugação e descarte do sobrenadante, foram adicionados 25mL de CaCl_2 10mmol L^{-1} e agitou-se a mistura solo-solução por 24 horas. Após esse período, a mistura solo-solução foi centrifugada e filtrada e o P do sobrenadante dosado por colorimetria, conforme Braga e Defelipo (1974), para a determinação da quantidade de P dessorvido.

Equações de regressão do 2º grau foram ajustadas entre o P adsorvido e o P dessorvido nas diferentes concentrações de P adicionado para cada tratamento. A partir do coeficientes b_1 dessas equações, estimou-se o índice tampão de P (ITP), conforme Accioly et al. (1985), modificado por Guilherme et al. (2000) para o P.

As variáveis P-rem, CMAP, ITP, pH e Al foram submetidas ao ajuste de modelos de regressão múltipla (superfície 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 SAS (SAS, 1989).

A partir da relação esterco bovino e calcário, que propiciou a produção máxima do feijoeiro, foram estimados os valores de P-rem, CMAP, ITP, pH e Al, correspondentes à produção máxima do feijoeiro. Esses valores e os valores obtidos no tratamento testemunha foram correlacionados entre si e com os atributos físicos, químicos e mineralógicos dos solos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

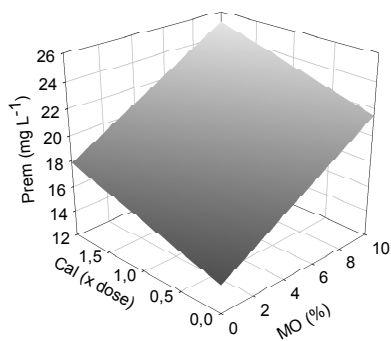
Para as variáveis CMAP e P-rem no solo OY, CMAP e P-rem no solo GX, CMAP e P-rem no solo RU, a interação esterco bovino (MO) x calagem (Cal) não foi significativa (Tabelas 5A, 6A, 7A e 8A).

Os modelos ajustados, para todas as variáveis, foram selecionados considerando um modelo geral (completo), o qual determinou um modelo menor (submodelo), o qual forneceu uma boa explicação da variável resposta em função das variáveis explicativas (Khuri & Cornell, 1996).

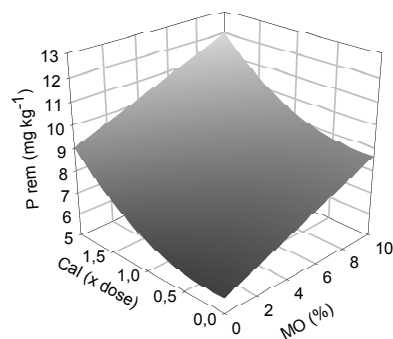
De modo geral, os maiores valores de P-rem foram obtidos em doses mais altas de esterco bovino (MO) e doses altas de calagem (Cal), com exceção do solo RU, em que os maiores valores de P-rem foram obtidos com 0,67 vez a dose de calagem recomendada para este solo (Figuras 1 e 2 e Tabelas 1 e 2). Na Figura 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 de R^2 dos parâmetros dos modelos matemáticos ajustados e ponto de máxima para os valores de P-rem.

Pelas Figuras 1 e 2 verificou-se que houve um aumento nos valores de P-rem em função da adição de esterco bovino e calagem. Com aumento das doses de esterco bovino e de calcário o P-rem apresentou uma função linear para os solos OY. No solo RU, GM e GX, o efeito foi quadrático.

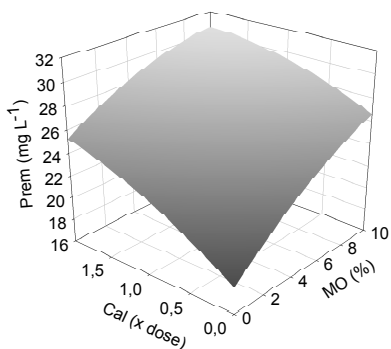
SOLO OY



SOLO GM



SOLO GX



SOLO RU

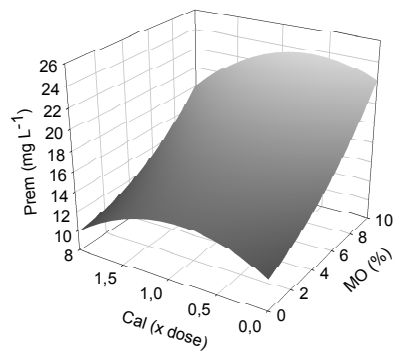


FIGURA 1 Representação gráfica da P-rem (mg L^{-1}), em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (Cal), na forma de superfície de resposta, para os solos OY, GM, GX e RU.

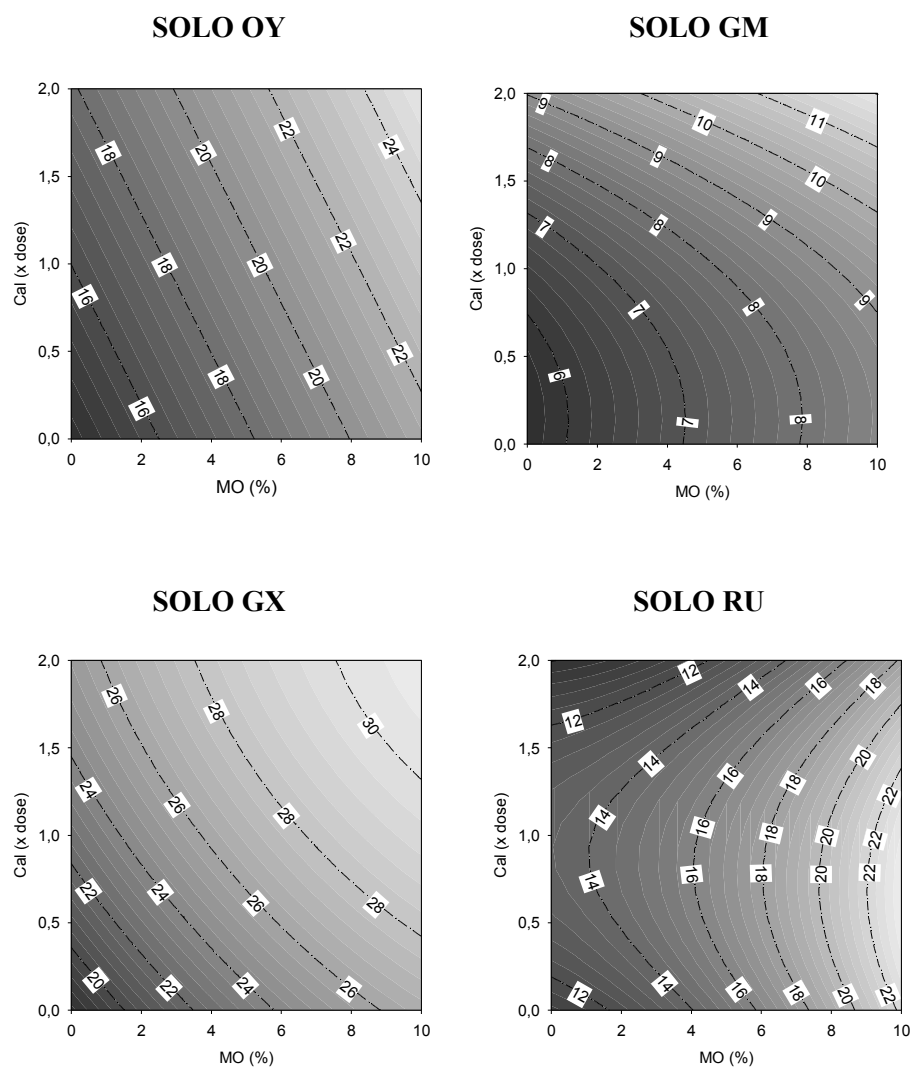


FIGURA 2 Corte horizontal sobre o espaço fatorial nas superfícies de resposta mostrando isoquantas correspondentes a diferentes faixas de valores para o P-rem (mg L^{-1}), em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (Cal).

TABELA 1 Modelos ajustados para o P-rem (y) em função da aplicação de esterco bovino (MO) e calcário (Cal), para os solos OY, GM, GX e RU.

Solo	Modelo ajustado
OY	$y = \beta_0 + \beta_1 \text{MO} + \beta_2 \text{Cal}$
GM	$y = \beta_0 + \beta_1 \text{MO} + \beta_2 \text{Cal} + \beta_3 \text{Cal}^2$
GX	$y = \beta_0 + \beta_1 \text{MO} + \beta_2 \text{Cal} + \beta_3 \text{MO}^2 + \beta_4 \text{Cal}^2 + \beta_5 \text{MO} * \text{Cal}$
RU	$y = \beta_0 + \beta_1 \text{MO} + \beta_2 \text{Cal} + \beta_3 \text{MO}^2 + \beta_4 \text{Cal}^2 + \beta_5 \text{MO} * \text{Cal}$

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-rem e doses ótimas de esterco bovino (MO) e calcário (Cal), em cada solo.

Parâmetro	SOLOS			
	OY	GM	GX	RU
β_0	14,16175***	5,668795455***	18,25294481***	11,07351299***
β_1	0,73425***	0,29925***	1,20757143***	0,45607143***
β_2	1,848**	-0,289045455 ^{ns}	5,17737622***	5,52877273***
β_3		0,984090909***	-0,03735714***	0,06614286***
β_4			-0,83818182***	-3,03954545
β_5			-0,14885714***	
R^2	96,17%	91,29%	95,95%	96,17%
P-rem (Max.)	25,20	12,02	30,62	23,59
(MO; Cal)	(10,00; 2,00)	(10,00; 2,00)	(10,00; 2,00)	(10,00; 0,67)

***, ^{ns} Significativo a 0,1% e não significativo, respectivamente.

O aumento dos valores de P-rem com o aumento das doses de MO pode ser devido ao bloqueio dos sítios de adsorção de P na superfície dos óxidos de ferro e de alumínio pelos compostos orgânicos, resultantes da decomposição do

esterco bovino. Segundo Fontes, Weed e Bown (1992), os grupos funcionais (COOH) bloqueiam a superfície da goethita, por exemplo, reduzindo a adsorção de P.

Nas altas doses de calcário não houve a tendência de redução dos valores de P-rem, exceto para o RU. Em doses elevadas de calcário pode ocorrer a precipitação de P com o Ca, formando compostos de baixa estabilidade na forma de fosfatos de cálcio (Novais & Smyth, 1999; Souza, 2005).

Na decomposição do resíduo orgânico há a formação de ácidos orgânicos que, de acordo com Miyazawa, Pavan e Franchini (2000), complexam o Al, Fe e elevam o pH em solos ácidos.

Segundo Hue (1991), os ácidos orgânicos que contêm vários grupos funcionais (ex.: OH e COOH) são capazes de formar complexos estáveis com os metais, podendo assim reduzir a retenção de P.

Com a aplicação do esterco bovino foi verificada uma redução significativa nos teores de Al trocável (Tabelas 3 e 4). Resultados semelhantes de redução nos teores e da toxidez por Al após a aplicação de resíduos vegetais e esterco de animais foi observada em vários estudos (Miyazawa, Pavan & Franchini, 2000; Franchini et al., 1999; Hue & Licudine, 1999; Andrade, Fernandes & Faquin, 2003). Segundo Hue et al. (1986), esta redução ocorre por dois processos químicos: hidrólise, devido ao aumento de pH e complexação por ácidos orgânicos.

Os menores valores de Al trocável foram obtidos na combinação de altas doses de esterco e de doses intermediárias de calcário (Tabelas 3 e 4), exceto para o GM, em que o menor valor de Al foi observado pela combinação maior de altas doses de esterco e também de calcário.

TABELA 3 Modelos ajustados para o Al (y) em função da aplicação de esterco bovino (MO) e calcário (Cal), para os solos OY, GM, GX e RU.

Solo	Modelo ajustado
OY	$y = \beta_0 + \beta_1 \text{MO} + \beta_2 \text{Cal} + \beta_3 \text{Cal}^2 + \beta_4 \text{MO} * \text{Cal}$
GM	$y = \beta_0 + \beta_1 \text{MO} + \beta_2 \text{Cal} + \beta_3 \text{MO}^2 + \beta_4 \text{Cal}^2 + \beta_5 \text{MO} * \text{Cal}$
GX	$y = \beta_0 + \beta_1 \text{MO} + \beta_2 \text{Cal} + \beta_3 \text{MO}^2 + \beta_4 \text{Cal}^2 + \beta_5 \text{MO} * \text{Cal}$
RU	$y = \beta_0 + \beta_1 \text{MO} + \beta_2 \text{Cal} + \beta_4 \text{MO} * \text{Cal}$

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

Parâmetro	SOLOS			
	OY	GM	GX	RU
β_0	0,3043181818***	0,7910162338***	0,5544058442***	0,267***
β_1	-0,18***	-0,0564857***	-0,064542857***	-0,0267***
β_2	-0,184318181***	-0,592766233***	-0,389441558***	-0,14371428***
β_3	0,0386363636***	0,0019285714***	0,0022142857***	0,0149714286***
β_4	0,01***	0,13181818***	0,07545455***	
β_5		0,0193714286***	0,0247428571***	
R^2	91,59%	96,73%	95,77%	81,31%
Al (min.)	0,07	0,11	0,06	0,00
(MO; Cal)	(10,00; 1,06)	(10,00; 1,96)	(10,00; 0,93)	(10,00; 1,60)

***Significativo a 0,1%

Para o pH, verificou-se aumento significativo nos seus valores em combinações das maiores doses de esterco bovino e de calcário para todos os

solos (Tabelas 5 e 6). A produção de íons OH^- pelo mecanismo de troca de ligantes que ocorre com os ácidos orgânicos na superfície de hidróxidos de Fe e Al no solo é um dos fatores para o aumento do pH (Iyamuremye, Dick e Baham, 1996).

TABELA 5 Modelos ajustados para o pH (y) em função da aplicação de esterco bovino (MO) e calcário (Cal), para os solos OY, GM, GX e RU.

Solo	Modelo ajustado
OY	$y = \beta_0 + \beta_1 \text{MO} + \beta_2 \text{Cal}$
GM	$y = \beta_0 + \beta_1 \text{MO} + \beta_2 \text{Cal}$
GX	$y = \beta_0 + \beta_1 \text{MO} + \beta_2 \text{Cal}$
RU	$y = \beta_0 + \beta_1 \text{MO} + \beta_2 \text{Cal}$

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

Parâmetro	SOLOS			
	OY	GM	GX	RU
β_0	4,5175***	4,22775***	4,22825***	5,0295***
β_1	0,0515***	0,04125***	0,08175***	0,0575***
β_2	0,454285714***	0,471142857***	0,634857143***	0,767714286***
R^2	97,83%	94,23%	96,83%	93,67%
pH (máx.)	5,94	5,58	6,31	7,14
(MO; Cal)	(10,00; 2,00)	(10,00; 2,00)	(10,00; 2,00)	(10,00; 2,00)

*** Significativo a 0,1%

Whalen et al. (2002) observaram que a aplicação de 20 a 30 g de esterco por kg de solo ou 1,5g de CaCO_3 por kg de solo foi suficiente para elevar o pH para 6,0, em solos do Canadá que foram cultivados com canola e trigo. Neste caso, a elevação do pH deve-se, principalmente, à presença de carbonato de cálcio e de ácidos orgânicos no esterco (Whalen et al., 2000).

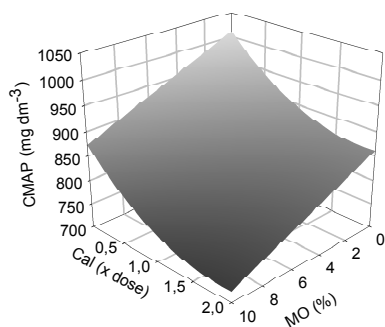
Whalen et al. (2002) recomendam, para a região de Alberta, no Canadá, a correção da acidez dos solos por meio da utilização de esterco bovino. Contudo, alertam para a necessidade de planejamento para que não ocorra contaminação ambiental.

Para a variável CMAP, verificou-se uma redução significativa nos seus valores com o aumento nas doses de esterco bovino e calcário. Os menores valores da CMAP foram observados com as combinações de altas doses de esterco bovino e de calcário, exceto para o solo RU, em que o efeito foi observado com doses intermediárias de calcário (Figuras 3 e 4; Tabelas 7 e 8). Os menores valores para CMAP foram observados nas doses 10% de esterco bovino e duas vezes a dose de calcário recomendada para os solos GM e GX; 10% de esterco bovino e 1,88 vez de calcário recomendado para o solo OY e 10% de esterco bovino e 0,93 vez de calcário para o solo RU (Tabelas 7 e 8).

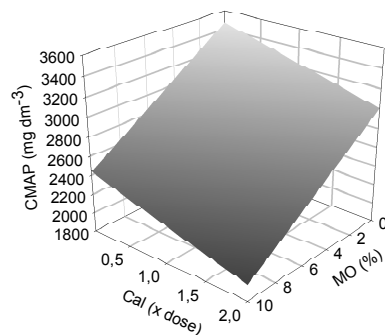
Estes resultados são concordantes com os obtidos por Andrade, Fernandes & Faquin (2003) e Souza (2005), que observaram redução da CMAP com a aplicação de esterco bovino e calcário.

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 7 e 8 descreve-se os modelos matemáticos ajustados para a CMAP com as respectivas estimativas e significância dos parâmetros, R^2 dos modelos e ponto de menor valor da variável estudada.

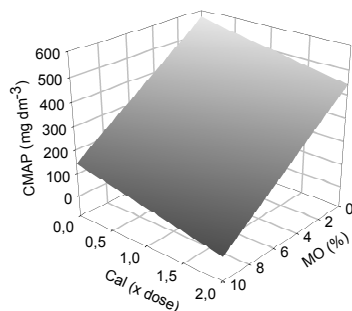
SOLO OY



SOLO GM



SOLO GX



SOLO RU

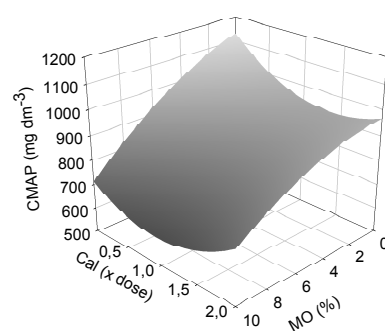


FIGURA 3 Representação gráfica da CMAP (mg dm⁻³), em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (Cal), na forma de superfície de resposta, para os solos OY, GM, GX e RU.

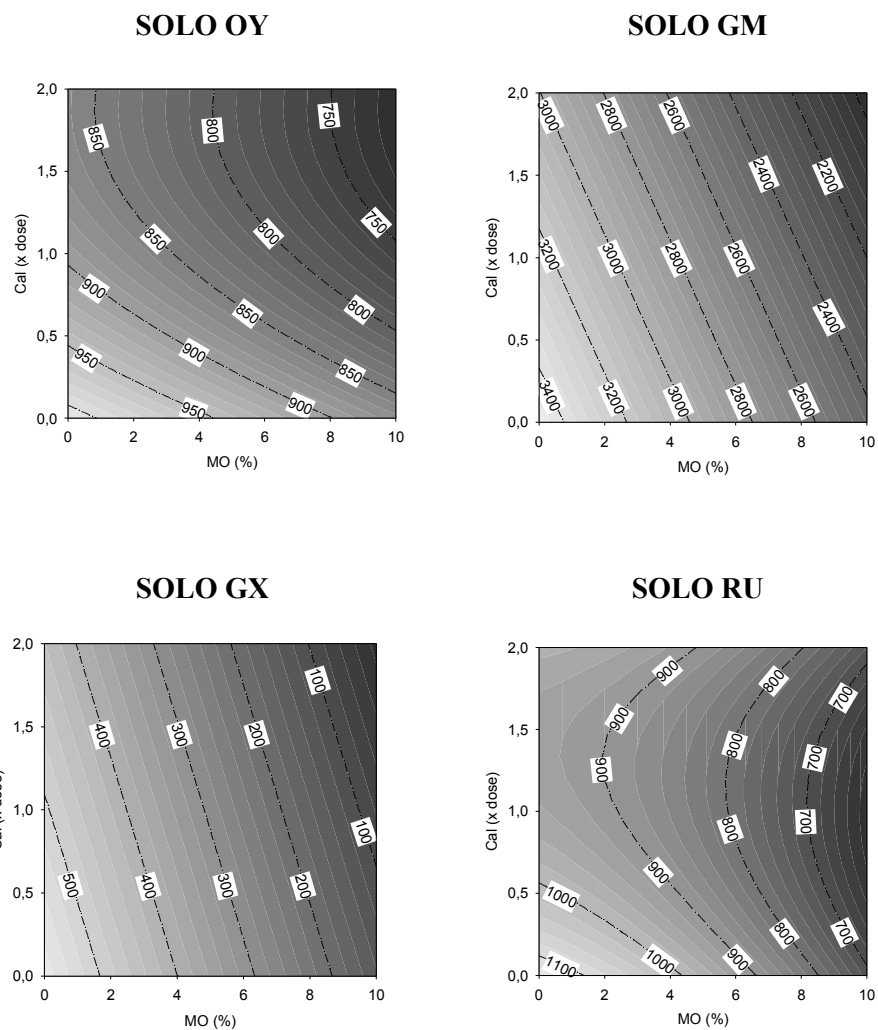


FIGURA 4 Corte horizontal sobre o espaço fatorial nas superfícies de resposta, mostrando isoquantas correspondentes a diferentes faixas de valores para a CMAP (mg dm^{-3}), em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (Cal).

TABELA 7 Modelos ajustados para o CMAP (y) em função da aplicação de esterco bovino (MO) e calcário (Cal), para os solos OY, GM, GX e RU.

Solo	Modelo ajustado
OY	$y = \beta_0 + \beta_1 \text{MO} + \beta_2 \text{Cal} + \beta_3 \text{Cal}^2$
GM	$y = \beta_0 + \beta_1 \text{MO} + \beta_2 \text{Cal}$
GX	$y = \beta_0 + \beta_1 \text{MO} + \beta_2 \text{Cal}$
RU	$y = \beta_0 + \beta_1 \text{MO} + \beta_2 \text{Cal} + \beta_3 \text{MO}^2 + \beta_4 \text{Cal}^2 + \beta_5 \text{MO} * \text{Cal}$

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

Parâmetro	SOLOS			
	OY	GM	GX	RU
β_0	1012,135***	3478,337***	571,583***	1133,504***
β_1	-13,897***	-104,176***	-42,866***	-21,867**
β_2	-160,321***	-236,983***	-65,359***	-298,471***
β_3	42,566**			-2,032**
β_4				107,841***
β_5				8,712***
R^2	88,34%	93,58%	95,10%	92,72%
CMAP (min.)	722,20 mg kg ⁻¹	1962,611mg kg ⁻¹	12,21mg kg ⁻¹	608,31mg kg ⁻¹
(MO; Cal)	(10,00; 1,88)	(10,00; 2,00)	(8,95; 2,00)	(10,00; 0,93)

***,** Significativo a 0,1% e 1%, respectivamente.

A complexação do Al trocável pelos ácidos orgânicos e a competição dos ácidos orgânicos pelos sítios de adsorção são mecanismos responsáveis pela redução da CMAP (Hue,1991).

Afif et al. (1995) estudaram, em amostras de solos sob cerrado, o efeito do tempo na adsorção competitiva do fosfato entre ácido málico e oxálico, e concluíram que é um efeito transitório, podendo, assim, aumentar a eficiência de utilização dos fertilizantes fosfatados.

A grande capacidade do solo GM de adsorver P pode ser atribuída ao maior teor de Fe oxalato (Tabela 1; Capítulo 2). Segundo Schwertmam & Taylor (1977), a matéria orgânica tende a inibir a cristalização dos óxidos de Fe, impedindo a transformação da ferridrita em substância mais cristalina. Guilherme et al. (2000) observaram que, para alguns solos de várzea, a matéria orgânica é fonte de elétrons para as reações de redução do Fe, as quais podem levar ao aumento da fração de óxidos de Fe de menor grau de cristalinidade no solo, com conseqüente aumento da capacidade de adsorção de ânions. Esse efeito também pode ser atribuído ao maior teor de alumínio na forma amorfa, como verificado para esse solo por Fernandes (1999), uma vez que os ânions orgânicos também interferem na cristalização do $\text{Al}(\text{OH})_3$ (Goh e Huang, 1985).

Earl et al. (1979) e Bowden et al. (1980) adicionaram citrato e fosfato em uma suspensão com óxidos de Fe e observaram que o citrato compete com o fósforo pelos sítios de adsorção e, conseqüentemente, diminui a adsorção de fósforo. No entanto, Liu & Huang (2000) observaram que o citrato, durante a formação de óxidos de Fe, modificou as propriedades da superfície dos óxidos de Fe provocando mudanças estruturais além do bloqueio dos sítios de adsorção. Segundo os autores, estas mudanças ocorreram devido ao aumento da cristalização de lepidocrocita, que resulta em uma menor superfície específica, em condições de baixa concentração de citrato.

Uma outra forma de diminuir o P adsorvido no solo é aumentando o aporte de carbono orgânico no solo, aumentando, assim, a atividade microbiana, que propicia aos microrganismos o uso do P adsorvido nos óxidos de Fe e Al e, conseqüentemente, a reciclagem deste nutriente (Silva et al., 1997). Este

processo é possível devido à produção de CO₂ e ácidos orgânicos, resultantes da mineralização do C orgânico pelos microrganismos do solo (Siqueira, Andrade e Faquin, 2004).

Os maiores valores de ITP foram obtidos sem aplicação de esterco bovino e calcário para o solo OY e RU; com a maior dose de esterco bovino e sem aplicação de calcário para o GX e com as maiores dose de esterco bovino e de calcário para o solo GM (Figuras 5 e 6; Tabelas 9 e 10).

Para os solos GM e GX, houve aumento do ITP, à medida que houve o aumento das doses de esterco de curral e não houve aumento do ITP com o aumento das doses de calcário. O ITP representa a resistência do solo às mudanças do P lábil como consequência de alterações no P da solução. Assim, os solos OY e RU, com o aumento das doses de calcário e esterco bovino, possuem uma maior liberação e aproveitamento do P, tanto na forma de fertilizantes quanto do P no solo.

De modo geral, para todos os solos com o aumento das doses de calcário e esterco bovino houve redução da CMAP, Al trocável e ITP e aumento do pH e P rem (Tabela 11). Estes atributos estão relacionados com a disponibilidade de P, mostrando assim que houve uma maior disponibilidade de P para as plantas de feijoeiro com o aumento das doses de esterco bovino e calcário, como discutido no Capítulo II.

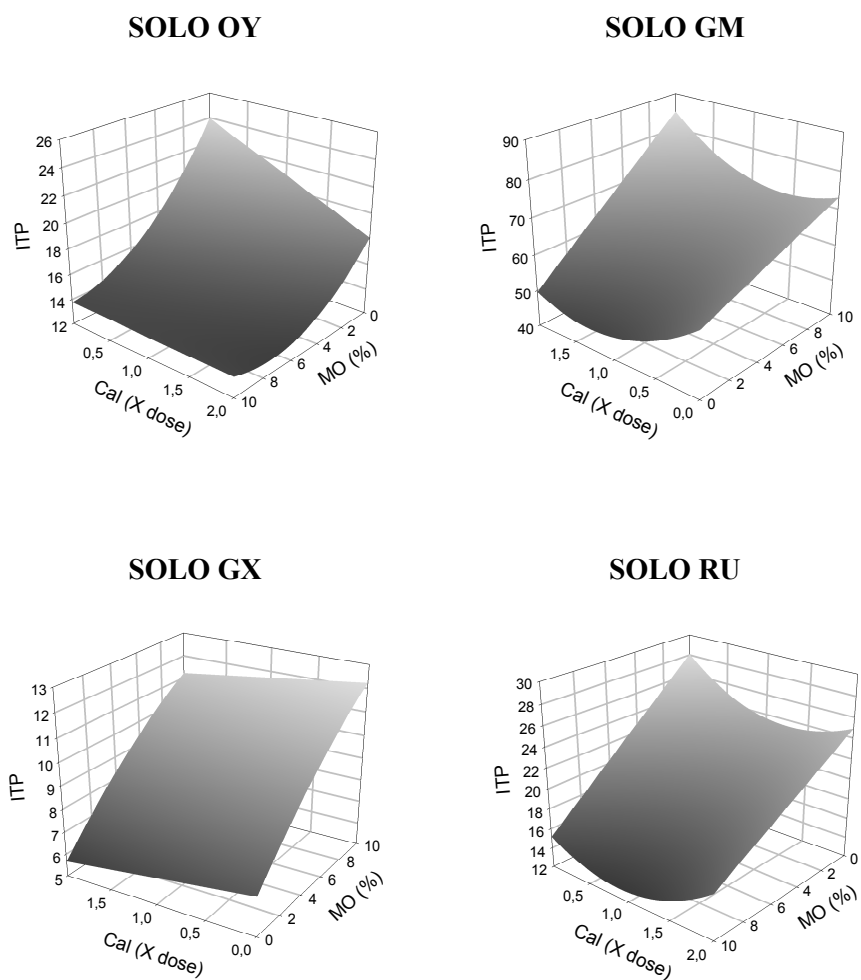


FIGURA 5 Representação gráfica do ITP, em função da aplicação de esterco bovino (MO) e calcário (Cal), na forma de superfície de resposta, para os solos OY, GM, GX e RU.

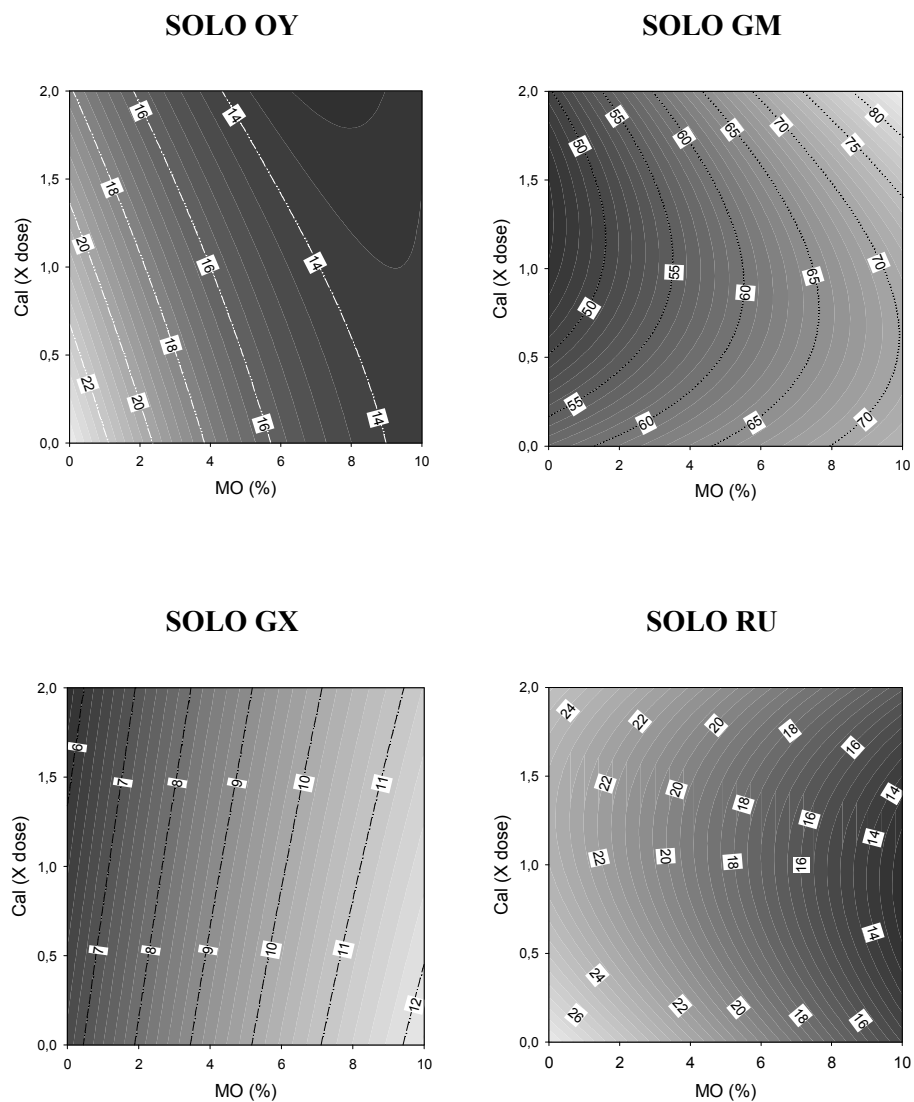


FIGURA 6 Corte horizontal sobre o espaço fatorial nas superfícies de resposta, mostrando isoquantas correspondentes a diferentes faixas de valores para o ITP, em função da aplicação de esterco bovino (MO) e calcário (Cal).

TABELA 9 Modelos ajustados para o ITP (y), em função da aplicação de esterco bovino (MO) e calcário (Cal), para os solos OY, GM, GX e RU.

Solo	Modelo ajustado
OY	$y = \beta_0 + \beta_1 \text{MO} + \beta_2 \text{Cal} + \beta_3 \text{MO}^2 + \beta_4 \text{MO} * \text{Cal}$
GM	$y = \beta_0 + \beta_1 \text{MO} + \beta_2 \text{Cal} + \beta_3 \text{Cal}^2 + \beta_4 \text{MO} * \text{Cal}$
GX	$y = \beta_0 + \beta_1 \text{MO} + \beta_2 \text{Cal}$
RU	$y = \beta_0 + \beta_1 \text{MO} + \beta_2 \text{Cal} + \beta_3 \text{Cal}^2$

TABELA 10 Estimativa dos parâmetros, significância e coeficientes de determinação (R^2) dos modelos ajustados apresentados na Tabela 9, e valores máximos para o ITP e quantidades ótimas de esterco bovino (MO) e calcário (Cal), em cada solo.

Parâmetro	SOLOS			
	OY	GM	GX	RU
β_0	23,97923***	58,081495***	6,904325***	27,106854***
β_1	-1,89566***	1,50186***	0,555275***	-1,0955***
β_2	-2,920142***	-19,582324***	-0,506228***	-6,268554***
β_3	0,08737857***	7,681590***		2,903909***
β_4	0,280748***	1,01544571***		
β_5				
R^2	97,03 %	87,49 %	78,28 %	89,45 %
ITP (máx.)	23,97	85,31	12,45	27,10
(MO; Cal)	(0,00; 0,00)	(10,00; 2,00)	(10,00; 0,00)	(0,00; 0,00)

***; Significativo a 0,1%

TABELA 11 Valores de capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP), índice tampão de fósforo (ITP), Al trocável, pH e P remanescente (P rem) correspondentes à máxima produção de MSGR.

	CMAP (mg dm ⁻³)	ITP	Al (cmmol dm ⁻³)	pH	P rem (mg kg ⁻¹)
OY	722,8 (-28,6) ¹	13,53(-43,55)	0,11 (-63,3)	5,94 (+31,5)	25,2 (+78,0)
GM	2421 (-30,4)	69,42 (19,53)	0,09 (-88,6)	5,4 (+27,7)	10,7 (+88,7)
GX	12,2 (-97,86)	11,44 (65,76)	0,15 (-72,7)	6,31 (+49,2)	30,6 (+67,8)
RU	669,3 (-40,9)	13,99 (-48,34)	0 (-100)	6,93 (+37,8)	20,1 (+81,8)

¹ Valores entre parênteses representam o percentual de aumento (+) ou redução (-) em relação à testemunha (Sem aplicação de calcário e de esterco bovino).

As correlações entre alguns atributos do solo (Tabela 1) com a CMAP e ITP foram positivas e significativas, tanto na testemunha quanto na máxima produção e, para o parâmetro P rem, foram negativas e significativas indicando, assim, que estes atributos influenciam diretamente a disponibilidade de P (Tabela 12).

A correlação foi negativa entre a CMAP e P rem, tanto na testemunha quanto na máxima produção, demonstrando como estas variáveis estão inversamente relacionadas. A correlação entre a MSPA e CMAP na testemunha foi negativa e na máxima produção foi positiva, indicando que o efeito da adsorção teve o seu efeito minimizado com a aplicação do esterco bovino e o calcário (Tabela 13).

TABELA 12 Coeficientes de correlação linear simples entre capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP), índice tampão de fósforo (ITP) e P remanescente (P rem) no tratamento testemunha e os correspondentes à produção máxima, com alguns atributos dos solos.

	Teor de argila	Mat. orgânica	Teor de gibbsita	Ferro oxalato
Testemunha				
CMAP	0,74 ⁰	0,96**	0,62 ^{ns}	0,87*
ITP	0,87*	0,88*	0,79*	0,96**
P rem	-0,87*	-0,78 ⁰	-0,82*	-0,98**
Máxima produção				
CMAP	0,83*	0,94**	0,73 ⁰	0,93**
ITP	0,64 ^{ns}	0,97**	0,50 ^{ns}	0,79*
P rem	-0,84*	-0,80*	-0,79*	-0,97**

** , * , ⁰ , ^{ns} , significativo a 1%, 5%, 10% e não significativo , respectivamente.

TABELA 13 Coeficientes de correlação linear simples entre os valores da capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP), índice tampão de fósforo (ITP), Al trocável, pH e P remanescente (P rem) e entre essas variáveis com P Mehlich-1 (Pmeh), matéria seca da parte aérea (MSPA), P foliar no florescimento (P flo), matéria seca de grãos (MSGR) e P acumulado na parte aérea (P acum), no tratamento testemunha e os correspondentes à produção máxima nos quatro solos.

	CMAP	ITP	Al	pH	P rem
Testemunha					
CMAP	1				
ITP	-0,63 ^{ns}	1			
Al	0,74 ⁰	0,04 ^{ns}	1		
pH	-0,33 ^{ns}	-0,38 ^{ns}	-0,79*	1	
P rem	-0,91*	0,85*	-0,43 ^{ns}	-0,06 ^{ns}	1
P meh	-0,67 ^{ns}	0,99**	-0,01 ^{ns}	-0,33 ^{ns}	0,87*
MSPA	-0,96**	0,69 ^{ns}	-0,65 ^{ns}	0,37 ^{ns}	0,88*
P flo	-0,57 ^{ns}	0,97**	0,08 ^{ns}	-0,30 ^{ns}	0,77 ⁰
MSGR	-0,99**	-0,95**	-0,78 ⁰	0,40 ^{ns}	0,88*
P acum	-0,93**	0,61 ^{ns}	-0,69 ^{ns}	0,48 ^{ns}	0,80 ⁰
Máxima produção					
CMAP	1				
ITP	-0,98**	1			
Al	-0,18 ^{ns}	0,26 ^{ns}	1		
pH	-0,71 ⁰	0,62 ^{ns}	-0,53 ^{ns}	1	
P rem	-0,95**	0,98**	0,46 ^{ns}	0,47 ^{ns}	1
P meh	-0,41 ^{ns}	0,27 ^{ns}	-0,17 ^{ns}	0,62 ^{ns}	0,26 ^{ns}
MSPA	0,92**	-0,89*	-0,34 ^{ns}	-0,60 ^{ns}	-0,91**
P flo	-0,51 ^{ns}	0,42 ^{ns}	0,33 ^{ns}	0,36 ^{ns}	0,50 ^{ns}
MSGR	0,63 ^{ns}	0,43 ^{ns}	-0,81*	-0,03 ^{ns}	-0,79*
P acum	0,78 ⁰	-0,84*	-0,74 ⁰	-0,13 ^{ns}	-0,93**

**, *, ⁰, ^{ns}, significativo a 1%, 5%, 10% e não significativo, respectivamente.

4 CONCLUSÕES

A aplicação de calcário e esterco bovino diminuiu a CMAP e o Al trocável e aumentou P rem e o pH, contribuindo para o melhor aproveitamento e a maior produção do feijoeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACCIOLY, 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, n.2, v.9, p.103-106, maio/ago. 1985.
- AFIF, E.; BARRÓN, V.; TORRENT, J. Organic matter delays but does not prevent phosphate sorption by cerrado soils from Brazil. **Soil Science**, Baltimore, n.3, v.159, p.207-211, Mar. 1995.
- ALVA, A. K.; LARSEN, S.; BILLE, S.W. The influence of rhizosphere in rice crop on resin-extractable phosphate in flood soils at various levels of phosphate applications. **Plant Soil**, Dordrecht, n.1, v. 56, p. 17-25, Mar. 1980.
- ALVAREZ V., V.H. **Avaliação da Fertilidade do Solo (Superfícies de resposta – Modelos aproximativos para expressar a relação fator-resposta)**. Viçosa, Imprensa Universitária, UFV. 1994. 75p.
- ALVAREZ V., V.H.; FONSECA, D.M. Definição de doses de fósforo para determinação da capacidade máxima de adsorção de fosfatos e para ensaios em casa de vegetação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, n.1, v.14, p.49-55, jan./abr. 1990.
- ALVAREZ V., V.H.; NOVAIS, R.F. de; DIAS, L.E.; OLIVEIRA, J.A. de; Determinação e uso do fósforo remanescente. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, n.1, v.25, p.27-32, jan./mar. 2000.
- ANDRADE, A. T.; FERNANDES, L. A.; FAQUIN, V. Organic residue, limestone, gypsum, and phosphorus adsorption by lowland soils. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, n.2, v.59, p. 349-355, abr./jun.. 2003.
- 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**, Campinas, v. 21, n. 4, p. 643-650, out./dez. 1997
- BOWDEN, J.W.; NAGARAJAH, S.; BARROW, N.J., POSNER, A.M.; QUIRK, J.P. Describing the adsorption of phosphate, citrate and selenite on a variable-charge mineral surface. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, n.1, v.18, p. 49-60, 1980.

BRAGA, J.M. & DEFELIPO, B.V. Determinação espectrofotométrica de fósforo em extratos de solo e material vegetal. **Revista Ceres**, Viçosa, n. 113, v.21, p.73-85, jan./fev. 1974.

BRANDON, D.M.; MIKKELSEN D.S. Flooding and draining rice soils influences P availability to crops. **Better Crops Plant Food**, Atlanta, n.1, v. 67 p. 28-29, 1983.

BRANDON, D.M.; MIKKELSEN D.S. Phosphorus transformations in alternately flooded California soils: I. Cause of plant phosphorus deficiency in rice rotation crops and correctional methods. **Soil Science Society American Journal**, Madison, n.5, v.43, p. 989-994, Sep./Oct. 1979.

EARL, K.D.; SYERS, J.K.; McLAUGHLIN, J.R. Origin of the effect of citrate, tartrate, and acetate on phosphate sorption by soils and synthetic gels. **Soil Science Society America Journal**, Madison, n.4, v. 43, p. 674-678, July/Aug. 1979.

FERNANDES, L.A. **Formas de alumínio, de fósforo e fosfatase ácida em solos de várzea cultivados com feijoeiro: influência de calagem e fósforo**. Lavras, 1999. 111p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Lavras.

FONTES, M.R.; WEED, S.B.; BOWEN, L.H. Association of microcrystalline goethite and humic acid in some oxisols from Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, n.3, v.56, p.982-990, May/June. 1992.

FRANCHINI, J.C.; MALAVOLTA, E.; MIYAZAWA, M.; PAVAN, M.A. Alterações químicas em solos ácidos após a aplicação de resíduos vegetais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, n.3, v. 23, p. 533-542, jul./set. 1999.

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

GUILHERME, L.R.G. **Calagem e inundação em solos de várzea cultivados com arroz: alterações em pH, nitrogênio, fósforo e enxofre**. Lavras, Escola Superior de Agricultura de Lavras, 1990. 113 p. (Tese de Mestrado).

GUILHERME, L.R.G.; CURI, N.; SILVA, M.L.N.; RENÓ, 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.

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

HUE, N.V.; CRADDOCK, G.R.; ADAMS, F. Effect of organics acids on aluminium toxicity in subsoils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, n.1, v. 50, p. 28-34, jan./fev. 1986.

HUE, N.V.; LICUDINE, D.L. Amelioration of subsoil acidity through surface application of organic manures. **Journal of Environmental Quality**, Madison, n.2, v.28, p. 623-632, Mar/Apr. 1999.

IYAMUREMYE, F.; DICK, R.P.; BAHAM, J. Organic amendments and phosphorus dynamics: I. phosphorus chemistry and sorption. **Soil Science**, Baltimore, n.7, v.161, p.426-435, July. 1996.

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

LIU, C.; HUANG, P.M. Kinetics of phosphate adsorption on iron oxides formed under the influence of citrate. **Canadian Journal Soil Science**, Ottawa, n.3, v. 80, p.445-454, Aug. 2000.

MIYAZAWA, M.; PAVAN, M.A.; FRANCHINI, J. C. Neutralização da acidez do perfil do solo por resíduos vegetais. **Informações agronômicas**, Piracicaba. N.92 – Dez, p. 1-8, 2000.

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

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

SAS® Instituto Inc., SAS/STAT® User's Guide, Version 6, Fourth Edition, Volume 2, Cary, NC: SAS Institute Inc., 1989, 846p.

SCHWERTMANN, U.; TAYLOR, R.M. Iron oxides. In: DIXON, J.B.; WEED, S.B., eds. **Minerals in soil environments**. Madison, Soil Science Society of America, 1977. p. 145-180.

SILVA, M.L.N.; CURI, N.; BLANCANEUX, P.; LIMA, J.M. de; CARVALHO, A.M. de. Rotação adubo verde - milho e adsorção de fósforo em latossolo vermelho-escuro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.32, n.6, p.649-654, jun. 1997.

SIQUEIRA, J.O.; ANDRADE, A.T.; FAQUIN, V. O papel dos microrganismos na disponibilização e aquisição de fósforo pelas plantas. In.: Yamada, T; Abdalla, S. R. S. e; **Anais do simpósio sobre fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba:POTAFOS, p. 537-562. 2004.

SOUZA, R. F de Dinâmica de fósforo em solos sob a influencia da calagem e adubação orgânica, cultivados com Feijoeiro. Lavras, 141 p., 2005.

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

WHALEN, J.K.; CHANG, C.; CLAYTON, G. W. Cattle manure and lime amendments to improve crop production of acidic soils in northern Alberta. **Canadian Journal Soil Science**, Ottawa, n.3, v. 82, p. 227-238, Aug. 2002.

WHALEN, J.K.; CHANG, C.; CLAYTON, G. W.; CAREFOOT, J. P. Cattle manure amendments can increse the pH of acid soils. **Soil Science Society America Journal**, Madison, n.3, v. 64, p. 962-966, May/June. 2000.

WILLETT, I.R. Phosphorus dynamics in relation to redox processes in flooded soils. **INTERNATION CONGRESS IN SOIL SCIENCE**, 13, Hamburg, 6:748-755, 1986.

CAPÍTULO IV

CALAGEM E ESTERCO BOVINO NAS FORMAS DE FÓSFORO EM SOLOS DE VÁRZEA

RESUMO

ANDRADE, Alex Teixeira. Calagem e esterco bovino nas formas de fósforo em solos de várzea. In: **Dinâmica do fósforo em solos de várzea cultivados com feijoeiro sob influência da calagem e adubação orgânica**. 2005 117p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.¹

O presente estudo foi conduzido em casa de vegetação do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras, com o objetivo de avaliar o efeito da calagem e aplicação de esterco bovino sobre a adsorção de fósforo em quatro solos de várzea e suas relações com a nutrição e a produção do feijoeiro. Conduziram-se quatro experimentos com os solos Organossolo Mésico (OY), Gleissolo Melânico (GM), Gleissolo Háptico (GX) e Neossolo Flúvico (RU) em vasos contendo 3dm³. Foi utilizado o delineamento 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; 0,5; 1 e 2 vezes a dose recomendada para atingir V=70%) nos quais foram cultivados três plantas de feijoeiro. Após a aplicação dos tratamentos e incubação por 60 dias, os solos foram secos e receberam as doses de P de 299, 460, 359 e 345 mg dm⁻³ de P para os solos OY, GM, GX e RU, respectivamente e foram novamente incubados por 30 dias. Após esse período, em subamostras de cada parcela experimental avaliaram-se as formas lábil, pouco lábil e não lábil de P. A aplicação de calcário e esterco bovino aumentou todas as frações de P nos solos de várzea. A adição de calcário e esterco bovino aumentou as frações lábeis e pouco lábeis e diminuiu a fração não lábil, com exceção do solo OY que aumentou. Independente da aplicação de calcário e esterco bovino, nos solos mais argilosos (OY, GM e RU), o P lábil representa uma pequena e o P não lábil a maior fração de P total. No solo mais arenoso (GX), houve um equilíbrio entre as formas de P no solo.

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

ABSTRACT

ANDRADE, Alex Teixeira. Liming and bovine manure in the forms of P in lowland soils. **In:_____ Phosphorus dynamics in lowland soils cultivated with beans under influence of liming and organic fertilization.** 2005. 117p. Thesis (Doctorate in Soils and Plant Nutrition) – Federal University of Lavras, Lavras, MG.

The present study was conducted in greenhouse in the Soil Science Department of the Federal University of Lavras with the purpose of evaluating the effect of liming and application of bovine manure on P adsorption in four lowland soils and their relationships with nutrition and bean plant yield. Four experiments with the soils Mesic Organosol (OY), Melanic Gleysol (GM), Haplic Gleysol (GX) and Fluvic Neosol (RU) were conducted in pots containing 3 dm. The completely randomized design in 4x5 factorial scheme with four replicates, the treatments being constituted of 5 doses of bovine manure (0%; 0.5%; 5.0%; 7.5% and 10% of the total volume of soil) and 4 doses of limestone (0; 0.5; 1 and 2 times the dose recommended to reach V=70%) in which three bean plants were cultivated. After application of the treatments and incubation for 60 days, the soils were dried and were given the doses of P of 299, 460, 359 and 345 mg dm⁻³ of P for the soils OY, GM, GX and RU soils, respectively and were again incubated for 30 days. After this period in subsamples of each experimental plot, the labile, little labile and non-labile of were evaluated. The addition of limestone and bovine manure increased the labile and little labile fractions and decreased the non-labile fraction with the exception of the soil OY which increased. Regardless of the application of limestone and bovine manure, in the most clayey soils (OY, GM and RU), labile P stands for a small and non-labile P the largest fraction of total P. In the most sandy soil (GX), there was an equilibrium among the forms of P in soil.

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

1 INTRODUÇÃO

Nos solos de várzea sob alterações nas condições hidrológicas a mobilidade e a reatividade do P são controladas pela composição química da água e do solo, pelo tamanho dos vários compartimentos de P no solo, pelas interações entre as frações solúveis com a fase sólida e a decomposição da matéria orgânica (Reddy et al., 1998). Segundo esses autores, o fósforo está presente nas formas inorgânica e orgânica, sendo a forma orgânica predominante em vários solos de várzea.

Por meio da extração sequencial, as formas de P orgânicas e inorgânicas fracionadas de acordo com a estabilidade química, podem ser diferenciadas pela sua biodisponibilidade (Hedley et al., 1982). As frações de P do solo variam com a alteração nas condições edáficas e com mudanças no ecossistema. Esta variabilidade complica o entendimento da biodisponibilidade de P em relação a outros bioensaios de P extraído e de frações de P determinado quimicamente, pois a interpretação pode ser diferente em condições edáficas iguais (Boers et al., 1984).

A disponibilidade do fósforo no solo abrange desde a sua participação na rede cristalina de alguns minerais até formas orgânicas estáveis, compondo a fração total (Pt), que se constitui de uma fração inorgânica (Pi) e outra orgânica (Po), as quais se encontram em equilíbrio dinâmico. Geralmente, o Pt é um índice de pouco valor para refletir a resposta das culturas, devido à baixa solubilidade dos compostos de fósforo (Sá, 1994).

As principais fontes de fósforo orgânico no solo são os resíduos vegetais, a adubação verde, a biomassa microbiana e o esterco de animais. Por isso, os sistemas de cultivo têm um impacto no conteúdo de fósforo orgânico em razão de sua assimilação por fungos e bactérias. Obserson et al. (1996) observaram que a aplicação regular de chorume bovino no solo aumenta o P

orgânico. Este efeito é devido, principalmente, ao fósforo orgânico presente no chorume e também ao fósforo orgânico assimilado pelos microrganismos.

Assim, este estudo teve como objetivo avaliar o efeito da calagem e a adição de esterco bovino sobre as formas de fósforo em quatro solos de várzea e suas relações com a nutrição fosfatada e produção do feijoeiro.

2 MATERIAL E MÉTODOS

A caracterização, a implantação e a condução dos experimentos estão descritas no capítulo 2.

Após o período de 60 dias de incubação do solo com esterco bovino e calagem, as amostras foram secas e aplicaram-se as doses de fósforo necessárias para atingir 90% da produção máxima de feijoeiro, que corresponderam a 299, 460, 359 e 345mg dm⁻³ de P para os solos OY, GM, GX e RU, respectivamente, de acordo com Fernandes et al. (2001). Os solos receberam, ainda, a aplicação de uma adubação básica com macro e micronutrientes que forneceu: 100mg de N, 100mg de K, 60mg de S, 40mg de Mg, 160mg de Ca, 0,5mg de B, 1,5mg de Cu e 5,0mg de Zn dm⁻³ de solo, na forma de reagentes p.a. As fontes utilizadas foram: KH₂PO₄, Ca(H₂PO₄)₂.H₂O, MgSO₄.7H₂O, (NH₄)₂.SO₄, NH₄H₂PO₄, NH₄NO₃, CuCl₂.2H₂O, ZnSO₄.7H₂O e H₃BO₃. As amostras de solo foram novamente incubadas com umidade próxima à capacidade de campo, por um período de 30 dias. Após esse período de incubação, foram coletadas subamostras de solo em cada parcela experimental para as determinações analíticas. O fracionamento seqüencial das formas de P nos solos foi realizado de acordo com o método modificado de Hedley, Stewart e Ghauhan (1982) (Figura 1).

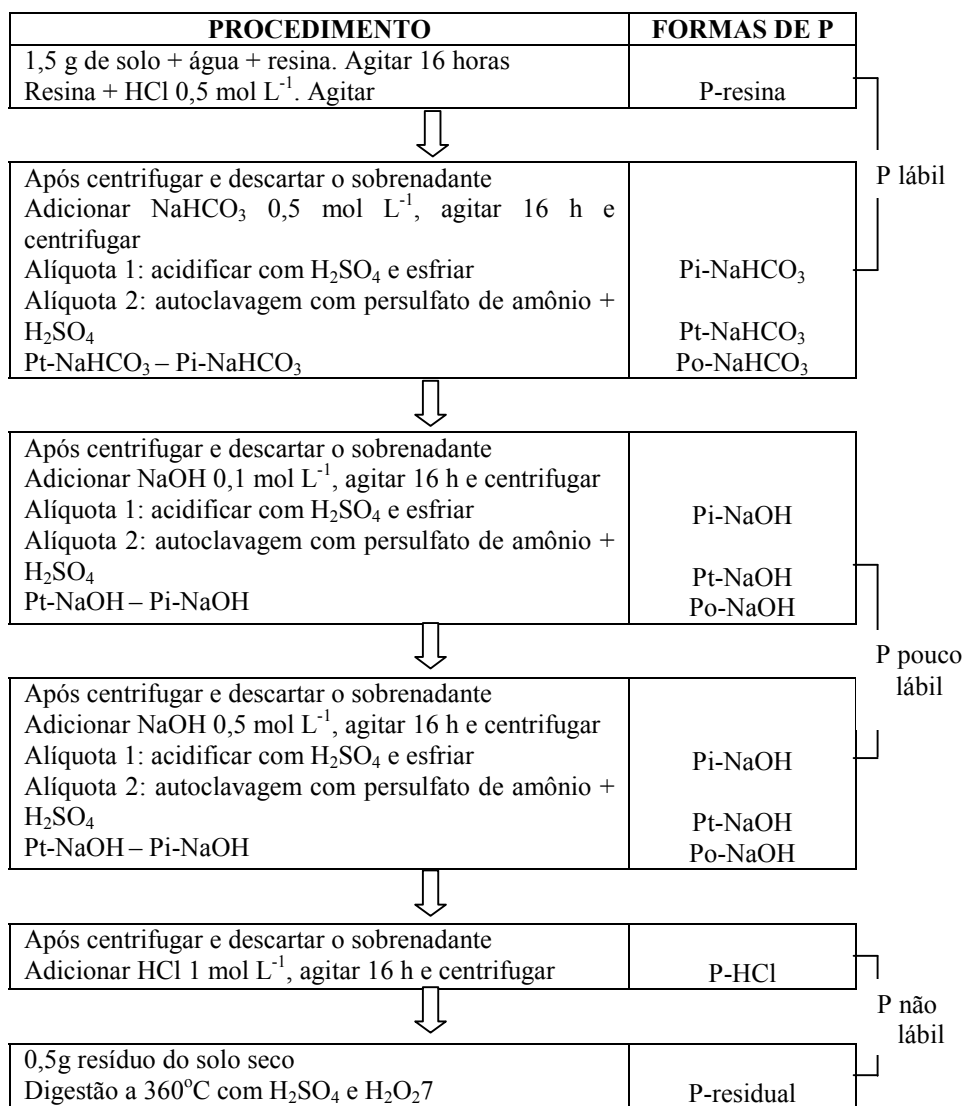


FIGURA 1 Procedimento simplificado de fracionamento seqüencial de fósforo (modificado de Hedley, Stewart e Ghauhan, 1982)

Por esse procedimento de fracionamento seqüencial, as formas de fósforo lábeis foram extraídas pela resina de troca aniônica (P res) saturada com

bicarbonato; o P inorgânico (Pi NaHCO_3) e o P orgânico (Po NaHCO_3) adsorvidos nas superfícies dos colóides foram extraídos com NaHCO_3 (0,5mol L^{-1} , a pH 8,5). As formas de fósforo pouco lábeis, correspondentes às formas inorgânicas ligadas a Fe e Al (Pi $\text{NaOH}_{0,1+0,5}$) e orgânicas associadas com compostos húmicos (Po $\text{NaOH}_{0,1+0,5}$), foram extraídas com NaOH (0,1 e 0,5mol L^{-1}). As formas de P relativamente insolúveis (fósforo não lábil), associadas com cálcio, foram extraídas com HCl 1,0 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 e Riley (1962).

Para as variáveis de P lábil (P res + Pi NaHCO_3 + Po NaHCO_3), P pouco lábil (Pi $\text{NaOH}_{0,5+0,1}$ + Po $\text{NaOH}_{0,5+0,1}$) e P não lábil (P HCl + P Residual), foram ajustados modelos de regressão múltipla (superfícies de resposta), em função das doses de calcário e de esterco aplicadas (Khuri e 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 correspondem 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 SAS (SAS, 1989).

A partir da relação entre o esterco bovino e calcário que propiciaram a produção máxima do feijoeiro foram estimados os valores de P lábil, P pouco lábil e P não lábil, correspondentes à produção máxima do feijoeiro. Esses valores e os obtidos no tratamento testemunha foram correlacionados entre si e com os atributos físicos, químicos e mineralógicos do solo.

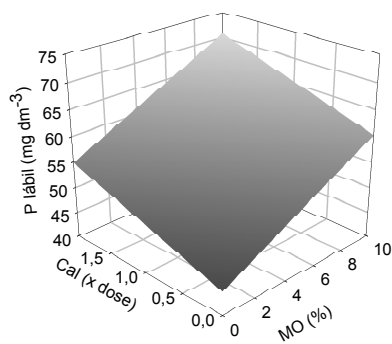
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os modelos ajustados, para todos as variáveis, foram selecionados considerando-se um modelo geral (completo) e selecionou-se um modelo menor (submodelo), o que forneceu uma boa explicação da variável resposta em função das variáveis explicativas (Khuri & Cornell, 1996).

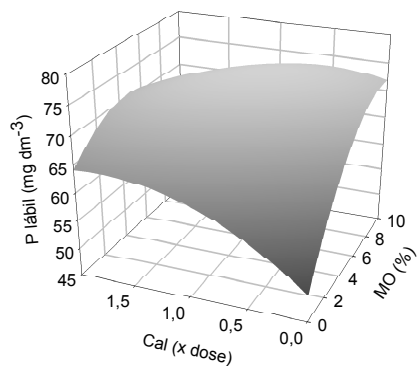
A interação calcário x esterco somente foi significativa para o P pouco lábil no solo OY, P lábil e P não lábil para o solo GM e P pouco lábil para o solo RU (Anexos 9A, 10A, 11A e 12A).

As formas de P res (Raij, 1991) e $P NaHCO_3$ (Tiessen, Salcedo e Sampaio, 1992) são consideradas disponíveis às plantas, e, neste trabalho, foram consideradas como P lábil. Para a variável fósforo lábil (P lábil), os solos OY e GX apresentaram os maiores valores com a maior dose de esterco bovino (MO) e maior dose de calcário (Figuras 2 e 3). Para o RU, o maior valor foi com a maior dose de esterco bovino e com 1,73 vez a dose recomendada de calcário. Para o solo GM, o esterco bovino e o calcário apresentaram um efeito quadrático, tendo o maior valor de P lábil sido observado com 7,3% de esterco bovino e 0,90 vez a dose de calcário (Figuras 2 e 3, Tabelas 1 e 2).

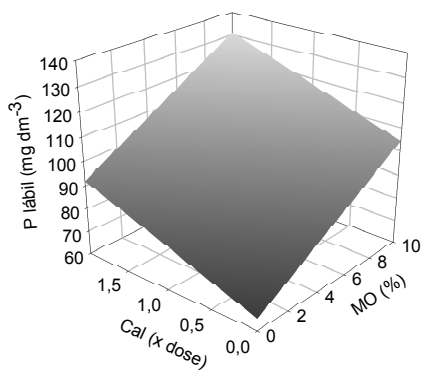
SOLO OY



SOLO GM



SOLO GX



SOLO RU

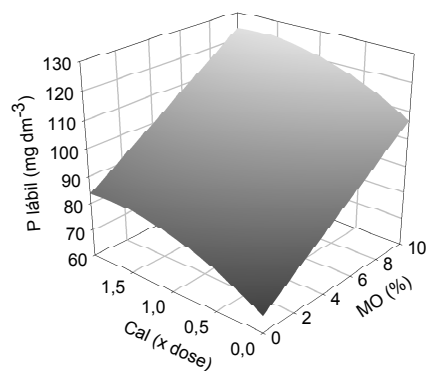


FIGURA 2 Representação gráfica da P lábil (mg dm⁻³), em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (Cal), na forma de superfície de resposta, para os solos OY, GM, GX e RU.

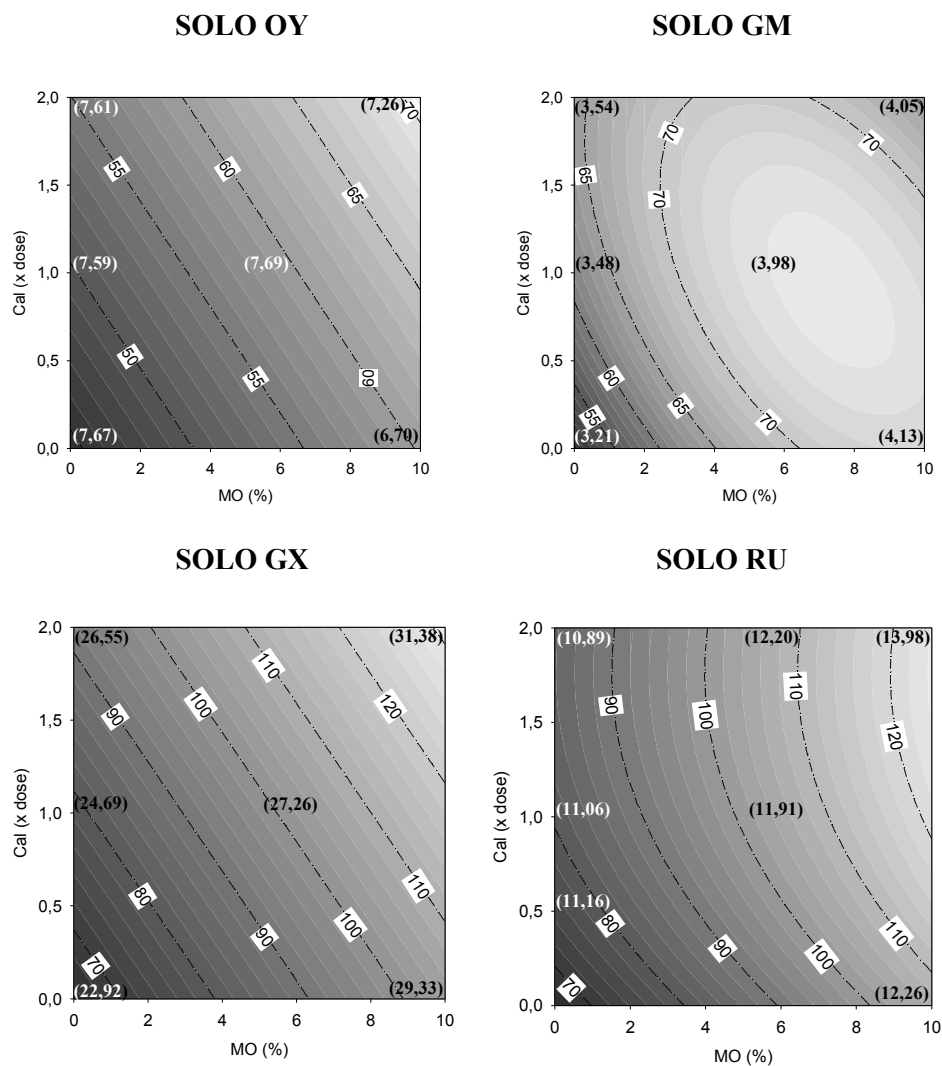


FIGURA 3 Corte horizontal sobre o espaço fatorial nas superfícies de resposta, mostrando isoquantas correspondentes a diferentes faixas de valores para o P lábil (mg dm^{-3}), em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (Cal). Os valores entre parentêses são a porcentagem da fração P lábil em relação ao P total.

TABELA 1 Modelos ajustados para o P lábil (y) em função da aplicação de esterco bovino (MO) e calcário (Cal), para os solos OY, GM, GX e RU.

Solo	Modelo ajustado
OY	$y = \beta_0 + \beta_1 \text{MO} + \beta_2 \text{Cal}$
GM	$y = \beta_0 + \beta_1 \text{MO} + \beta_2 \text{Cal} + \beta_3 \text{MO}^2 + \beta_4 \text{Cal}^2 + \beta_5 \text{MO} * \text{Cal}$
GX	$y = \beta_0 + \beta_1 \text{MO} + \beta_2 \text{Cal}$
RU	$y = \beta_0 + \beta_1 \text{MO} + \beta_2 \text{Cal} + \beta_3 \text{Cal}^2$

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 lábil e quantidades ótimas de esterco bovino (MO) e calcário (Cal), em cada solo.

Parâmetro	SOLOS			
	OY	GM	GX	RU
β_0	44,4449***	49,74712597***	65,0549***	66,10158182***
β_1	1,5827***	4,83700286***	3,9372***	4,0548***
β_2	5,24525714***	15,90857403***	13,38911429***	20,18971818***
β_3		-0,26251429***		-5,72463636**
β_4		-4,37709091***		
β_5		-1,09532571***		
R^2	88,44%	78,74%	77,65%	91,27%
Max.	70,76	74,64	131,20	124,44
(MO; Cal)	(10,00; 2,00)	(7,30; 0,93)	(10,00; 2,00)	(10,00; 1,73)

***, ** Significativo a 0,1% e 1%, respectivamente.

Para a variável P pouco lábil, o solo GX apresentou o maior valor, com a maior dose de esterco bovino e calcário. Para o solo OY e GM, o maior valor foi com a maior dose de esterco bovino e com dose de 1,47 e 1,07 vez a dose

recomendada para o calcário, respectivamente. Para o solo RU o maior valor de P lábil foi observado com 5,40% de esterco bovino e a maior dose de calcário (Figuras 4 e 5, Tabelas 3 e 4).

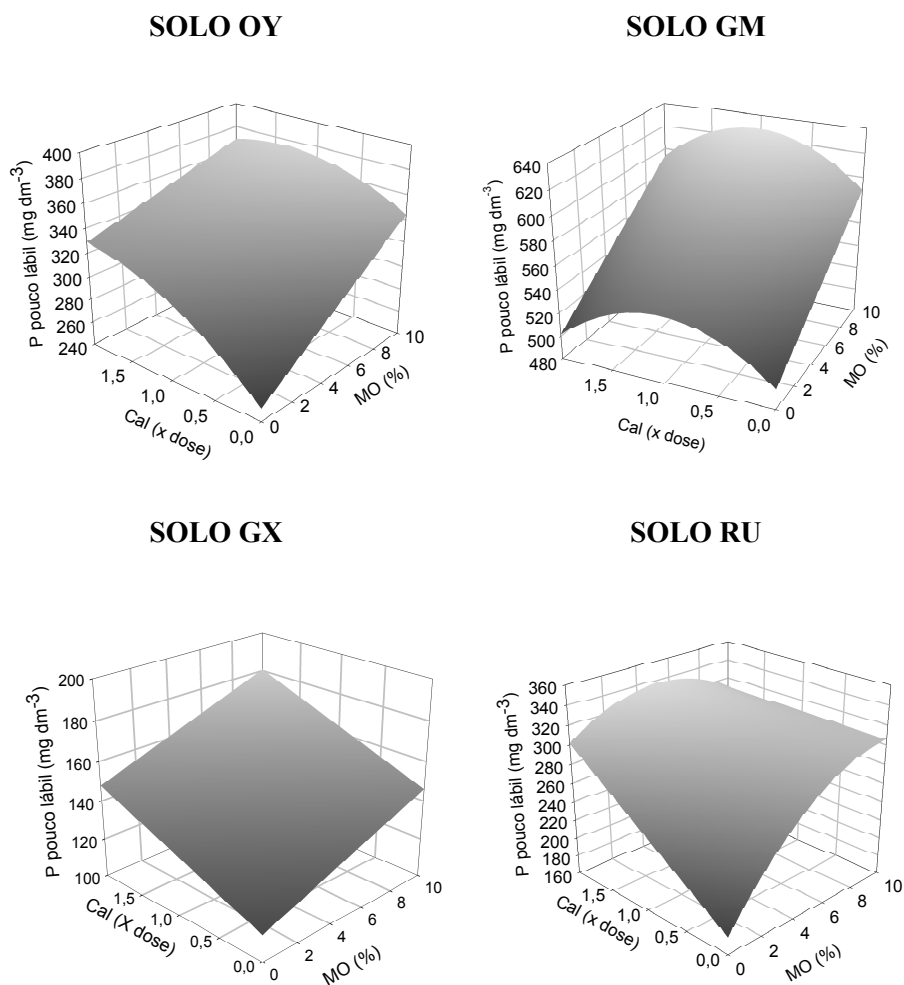


FIGURA 4 Representação gráfica da P pouco lábil (mg dm⁻³), em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (Cal), na forma de superfície de resposta, para os solos OY, GM, GX e RU.

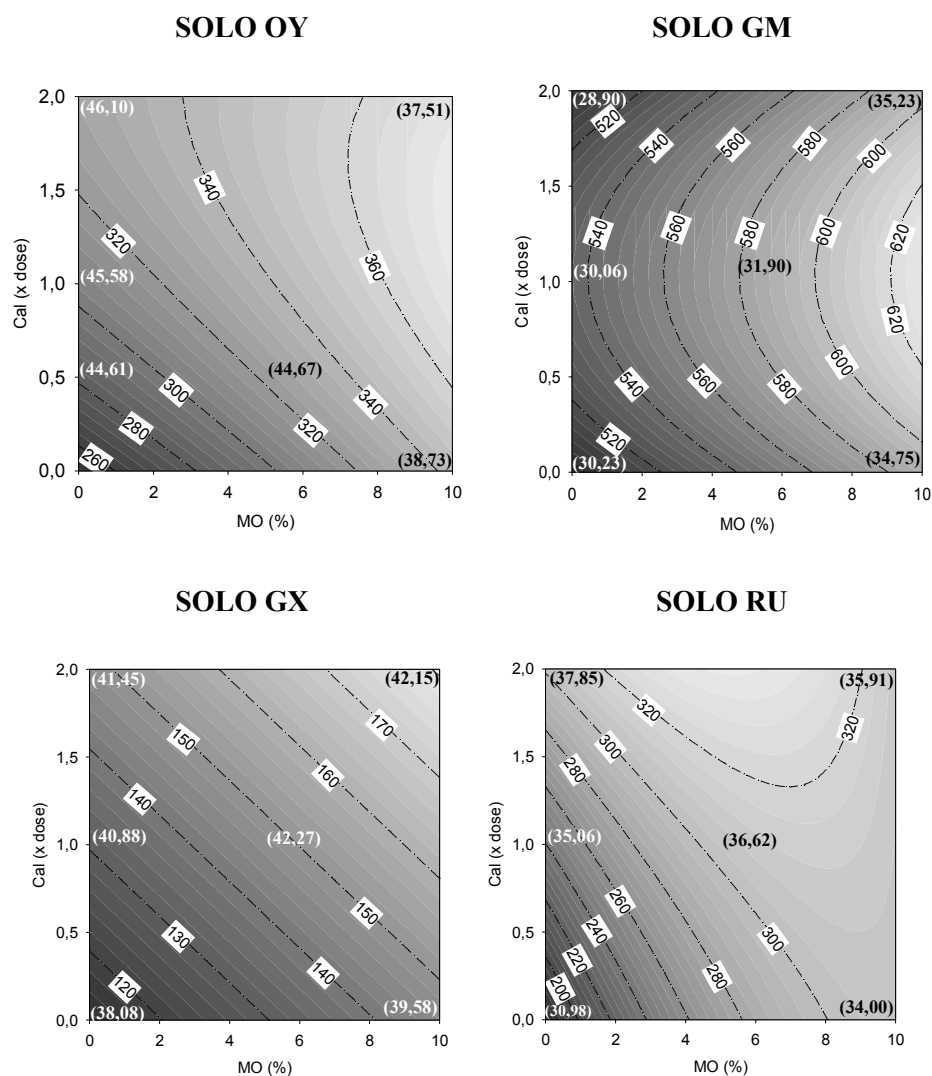


FIGURA 5 Corte horizontal sobre o espaço fatorial nas superfícies de resposta, mostrando isoquantas correspondentes a diferentes faixas de valores para o P pouco lábil (mg dm^{-3}), em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (Cal). Os valores entre parênteses são a porcentagem da fração P pouco lábil em relação ao P total.

TABELA 3 Modelos ajustados para o P pouco lábil (y) em função da aplicação de esterco bovino (MO) e calcário (Cal), para os solos OY, GM, GX e RU.

Solo	Modelo ajustado
OY	$y = \beta_0 + \beta_1 \text{MO} + \beta_2 \text{Cal} + \beta_3 \text{Cal}^2 + \text{MO} * \text{Cal}$
GM	$y = \beta_0 + \beta_1 \text{MO} + \beta_2 \text{Cal} + \beta_3 \text{Cal}^2$
GX	$y = \beta_0 + \beta_1 \text{MO} + \beta_2 \text{Cal}$
RU	$y = \beta_0 + \beta_1 \text{MO} + \beta_2 \text{Cal} + \beta_3 \text{MO}^2 + \beta_4 \text{MO} * \text{Cal}$

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 pouco lábil e quantidades ótimas de esterco bovino (MO) e calcário (Cal), em cada solo.

Parâmetro	SOLOS			
	OY	GM	GX	RU
β_0	251,0292045***	496,5925568***	113,178025***	177,7948464***
β_1	9,26984***	9,247175***	3,283275***	25,1612829***
β_2	69,2656526***	76,1235682***	17,3305429***	61,8024***
β_3	-15,2685909***	-36,8101364***		-1,2399643***
β_4	-2,5651314***			-5,94436***
β_5				
R^2	93,76%	76,38%	93,27%	93,31%
Max.	374,85	628,38	180,67	336,91
(MO; Cal)	(10,00; 1,47)	(10,00; 1,07)	(10,00; 2,00)	(5,40; 2,00)

*** Significativo a 0,1%

Para a variável P não lábil, o solo OY apresentou o maior valor com a maior dose de esterco de bovino e calcário e o GM apresentou o maior valor sem esterco de bovino e com duas vezes a dose de calcário recomendada; para o GX,

não houve diferença e para o RU com a maior dose de esterco bovino e sem calcário (Figuras 6 e 7, Tabelas 5 e 6).

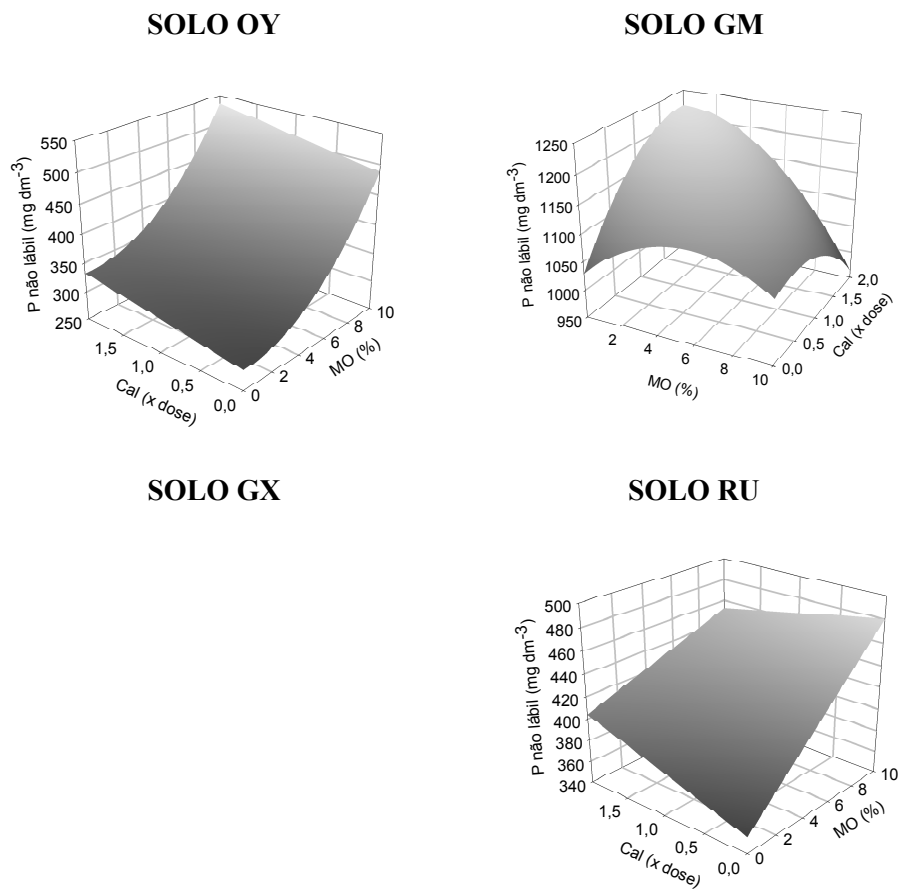


FIGURA 6 Representação gráfica da P não lábil (mg dm⁻³), em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (Cal), na forma de superfície de resposta, para os solos OY, GM, GX e RU.

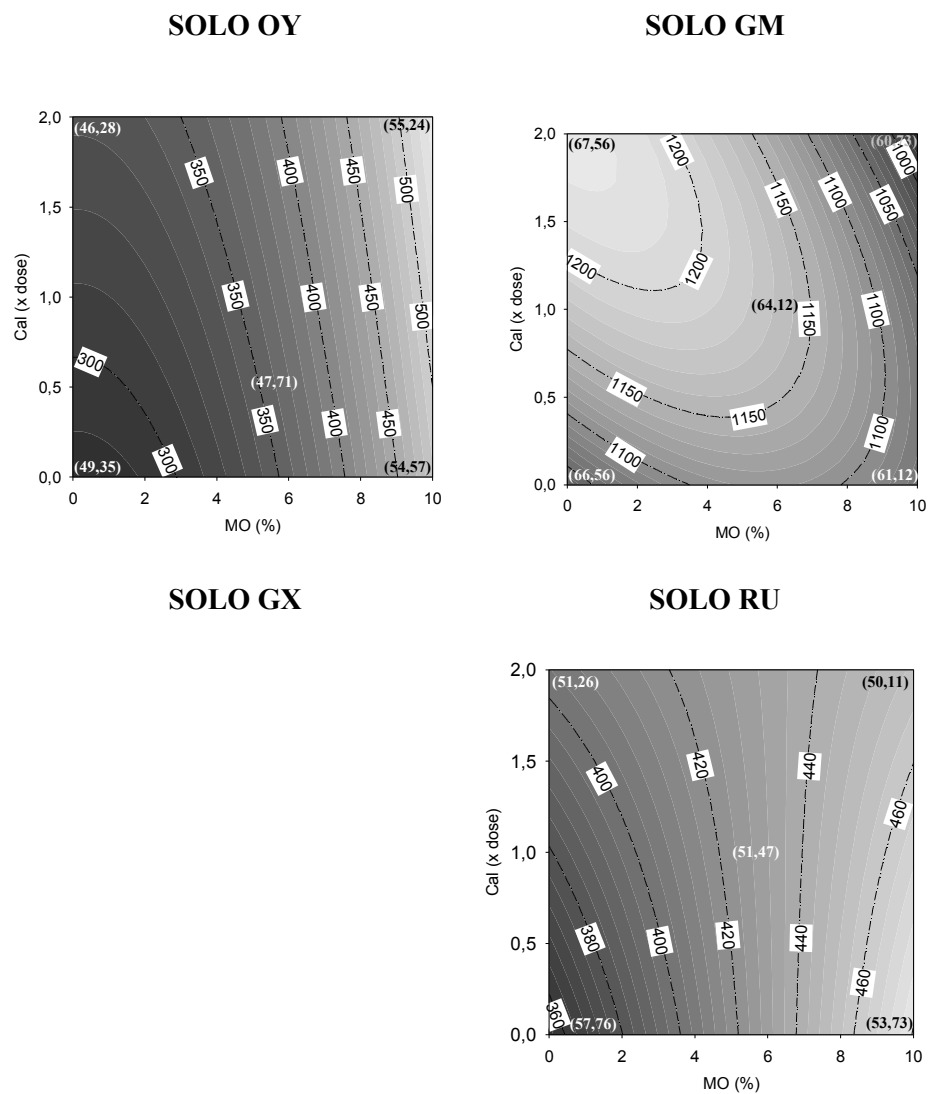


FIGURA 7 Corte horizontal sobre o espaço fatorial nas superfícies de resposta, mostrando isoquantas correspondentes a diferentes faixas de valores para o P não lábil (mg dm^{-3}), em função da aplicação de matéria orgânica (MO) e calcário (Cal). Os valores entre parentêses são a porcentagem da fração P HCl + residual em relação ao P total.

TABELA 5 Modelos ajustados para o P não lábil (y) em função da aplicação de esterco bovino (MO) e calcário (Cal), para os solos OY, GM, GX e RU.

Solo	Modelo ajustado
OY	$y = \beta_0 + \beta_1 \text{MO} + \beta_2 \text{Cal} + \beta_3 \text{MO}^2$
GM	$y = \beta_0 + \beta_1 \text{MO} + \beta_2 \text{Cal} + \beta_3 \text{MO}^2 + \beta_4 \text{Cal}^2 + \beta_5 \text{MO} * \text{Cal}$
GX	$y = \beta_0$
RU	$y = \beta_0 + \beta_1 \text{MO} + \beta_2 \text{Cal} + \beta_3 \text{MO} * \text{Cal}$

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

Parâmetro	SOLOS			
	OY	GM	GX	RU
β_0	283,8690857***	1030,178737***	100,65935***	354,5729***
β_1	-0,3943036***	28,901443***		12,59586***
β_2	24,3015143***	192,237466***		24,6281142***
β_3	2,0801929***	-2,55364***		-3,84444***
β_4		-47,662818**		
β_5		-14,695171***		
R^2	91,72%	67,40%		85,59%
Max.	536,55	1224,00	100,65935	480,53
(MO; Cal)	(10,00; 2,00)	(0,00; 2,00)		(10,00; 0,00)

***,ns significativo a 0,1% e não significativo

Houve aumento nas frações de P lábil, P pouco lábil e P não lábil para os solos OY, GM, GX e RU, com aumento das doses de esterco e de calcário, com exceção do P não lábil para o solo GX (Tabela 7).

As frações de P lábil foram afetadas pela adição de esterco bovino e calcário, sendo uma importante fração para o suprimento de P às plantas. Nos solos GM e OY, com maiores teores de matéria orgânica, o P lábil representa uma fração de 6% e 3% do P total no solo, respectivamente, sendo considerado uma fração muito pequena. Nos solos GX e RU, com menores teores de matéria orgânica, o P lábil representou 23% e 11% do P total, respectivamente (Figura 8).

De modo geral, as formas de P lábil foram as que mais aumentaram com a aplicação das doses de esterco e calcário em relação à testemunha (Tabela 7).

TABELA 7 Valores de P lábil, P pouco lábil e P não lábil correspondentes à máxima produção de MSGR.

	P lábil	P pouco lábil	P não lábil
OY	70,76 (59,2) ¹	369,88 (47,4)	536,55 (89,0)
GM	70,64 (50,06)	553,38 (11,4)	1141,1 (10,8)
GX	131,2 (101,69)	180,67 (59,6)	100,7 (0,00)
RU	124,44 (88,26)	311,44 (75,2)	456,6 (28,77)

¹Valores entre parênteses representam a % de aumento em relação à testemunha (sem calcário e esterco bovino).

O P pouco lábil correspondeu a 42%, 31%, 40% e 35% do P total, para os solos OY, GM, GX e RU, respectivamente (Figura 8). O P pouco lábil é considerado uma forma de P associado a fosfatos de Fe e Al amorfos e, ou, cristalinos (Willians, Mayer e Nriagu, 1980). Em Histosols, a maior contribuição do P orgânico para o P pouco lábil dos solos se deve à maior presença de Po ligado a ácidos fúlvicos, que pode se tornar disponível (Tabela 13A). Já o fósforo orgânico (Po) ligado a ácidos húmicos se encontra apenas na

forma não disponível (Ivanoff, Reddy e Robinson, 1998). O $\text{Po NaOH}_{0,1+0,5}$ está associado a formas menos disponíveis de P e que envolvem transformações a longo prazo (Bowman & Cole, 1978).

A fração residual representa o P fortemente retido em minerais, como hematita, goetita e gibbsita (Smeck, 1985) e formas estáveis de Po (Stewart et al. 1980) e a fração P HCl, que representa o Pi contido nos fosfatos de cálcio e fortemente adsorvido (Tiessen et al., 1984). Esta fração é considerada não lábil e, no presente estudo, foi afetada pela adição de esterco bovino e calcário, tendo sido diminuída nos solos GM, GX e RU, e aumentando no solo OY com aplicação do esterco bovino e reduzindo com o calcário (Figura 8).

Houve uma correlação significativa e positiva nos três atributos do solo (teor de argila, matéria orgânica, Fe oxalato) para as frações de P pouco lábil e de P não lábil na testemunha e na máxima produção (Tabela 8).

TABELA 8 Coeficientes de correlação linear simples entre P lábil, P pouco lábil e P não lábil com alguns atributos do solo, no tratamento testemunha e os correspondentes à produção máxima.

	Teor de argila	Mat. orgânica	Teor de gibbsita	Fe oxalato
Testemunha				
P lábil	0,66 ^{ns}	-0,57 ^{ns}	-0,61 ^{ns}	-0,50 ^{ns}
P pouco lábil	0,81*	0,96**	0,70 ^{ns}	0,88*
P não lábil	0,78 ⁰	0,93**	0,68 ^{ns}	0,91**
Máxima produção				
P lábil	-0,80 ⁰	-0,70 ^{ns}	-0,73 ⁰	-0,67 ^{ns}
P pouco lábil	0,93**	0,88*	0,84*	0,95**
P não lábil	0,90*	0,90*	0,81 ⁰	0,96**

** , * , ⁰ , ^{ns} significativo a 1%, 5%, 10% e não significativo, respectivamente.

Verificou-se correlação positiva entre o CMAP e as formas pouco lábil e não lábil de P, na testemunha e na máxima produção, observando-se que existe

relação entre as formas pouco disponíveis e a capacidade de fixação do P no solo (Tabela 9).

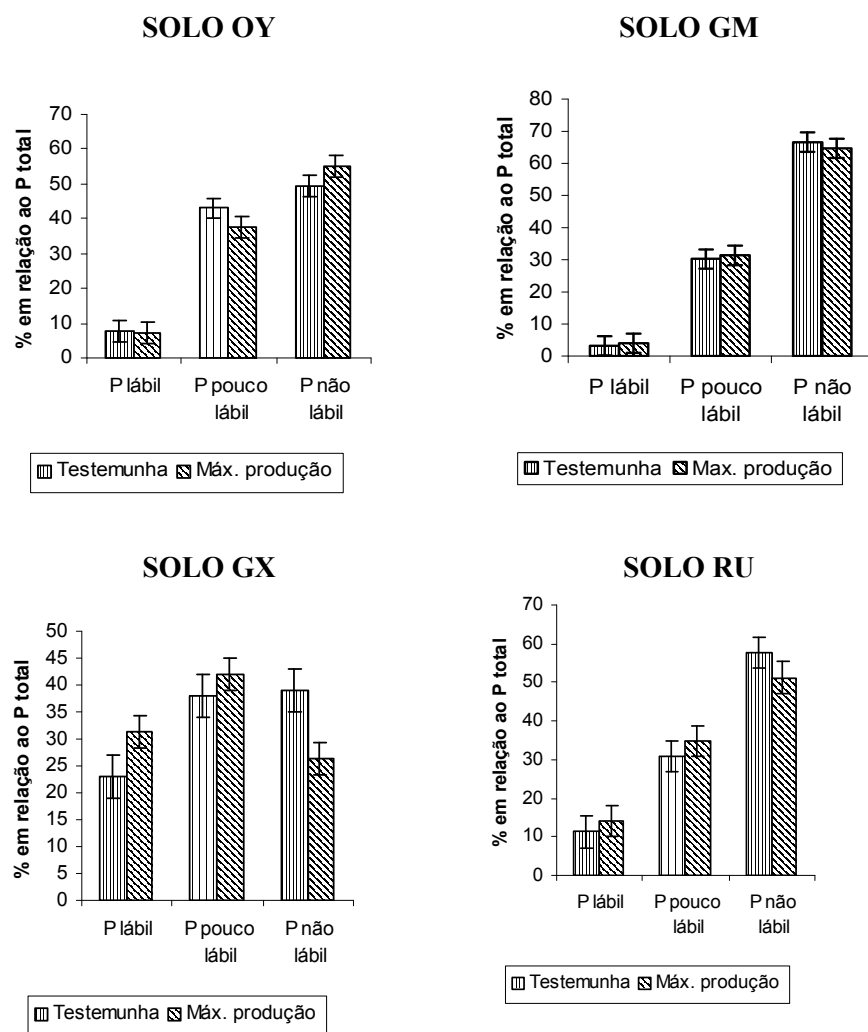


FIGURA 8 Representação gráfica do percentual das frações de P dos solos de várzea em relação ao fósforo total (Ptotal), no tratamento testemunha e os valores correspondentes à produção máxima.

TABELA 9 Coeficientes de correlação linear simples para os valores do P lábil, P pouco lábil e P não lábil e entre essas formas de fósforo com capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP), índice tampão de fósforo (ITP), Al tocável, pH, P remanescente (P rem) P Mehlich-1 (Pmeh), matéria seca da parte aérea (MSPA), P foliar no florescimento (P flo), matéria seca de grãos (MSGR) e P acumulado na parte aérea (P acum), no tratamento testemunha e os correspondentes à produção máxima nos quatro solos.

	P lábil	P pouco lábil	P não lábil
Testemunha			
P lábil	1		
P pouco lábil	-0,64 ^{ns}	1	
P não lábil	-0,44 ^{ns}	0,96**	1
CMAP	-0,44 ^{ns}	0,97**	0,99**
ITP	0,52 ^{ns}	-0,69 ^{ns}	-0,68 ^{ns}
pH	0,37 ^{ns}	-0,37 ^{ns}	-0,26 ^{ns}
P rem	0,35 ^{ns}	-0,88*	-0,94**
P meh	0,54 ^{ns}	0,73 ⁰	0,73 ⁰
MSPA	0,66 ^{ns}	-0,99**	-0,96**
P flo	0,67 ^{ns}	-0,68 ^{ns}	-0,63 ^{ns}
MSGR	0,45 ^{ns}	-0,97**	-0,98**
P acum	0,73 ⁰	-0,98**	-0,92**
Máxima produção			
P lábil	1		
P pouco lábil	-0,83*	1	
P não lábil	-0,77 ⁰	0,99**	1
CMAP	-0,71 ^{ns}	0,97**	0,99**
ITP	0,59 ^{ns}	-0,93**	-0,96**
pH	0,81*	-0,71 ^{ns}	-0,70 ^{ns}
P rem	0,55 ^{ns}	-0,92**	-0,94**
P meh	0,92**	-0,59 ^{ns}	-0,51 ^{ns}
MSPA	-0,82**	0,98**	0,97**
P flo	0,83*	-0,70 ^{ns}	-0,63 ^{ns}
MSGR	-0,45 ^{ns}	0,71 ^{ns}	0,78 ⁰
P acum	-0,30 ^{ns}	0,75 ⁰	0,78 ⁰

** , * , ⁰ , ^{ns} significativo a 1%, 5%, 10 % e não significativo

Verificou-se ainda uma correlação positiva entre a MSPA com as formas pouco lábil e não lábil na testemunha, havendo reposição do P por estas formas, o que não foi observado na máxima produção, por possuir uma maior concentração nas formas lábeis de P (Tabela 9).

4 CONCLUSÕES

A aplicação de calcário e esterco bovino resultou no aumento das frações de P nos solos de várzea, contribuindo para o melhor aproveitamento do fósforo e a maior produção do feijoeiro.

A adição de calcário e esterco bovino aumentou as frações lábeis e pouco lábeis e diminuiu a fração não lábil, com exceção do solo OY, que aumentou.

Independentemente da aplicação de calcário e esterco bovino, nos solos mais argilosos (OY, GM e RU), o P lábil representa uma pequena e o P não lábil a maior fração de P total. No solo mais arenoso (GX), houve um equilíbrio entre as formas de P no solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

BOERS, P.C.M., BONGER, J.W.; WISSELO, A.G.; CAPPENBERG, E. Loosdrecht lakes restoration project: Sediment phosphorus distribution a release from sediments. **Mitteilungen Internationale Vereinigung fur Theoretische Und Angewandte Limnologie**, Stuttgart, v.22, p. 842-847, 1984.

BOWMAN, R.A.; COLE, C.V.; Transformations of organic phosphorus substrates in soil are evaluated by NaHCO_3 extration. **Soil Science**, Baltimore, v. 125, p. 49-54, 1978.

FERNANDES, L. A.; FAQUIN, V.; ANDRADE, A. T.; OLIVEIRA JUNIOR, A. C. DE; FURTINI NETO, A. E.; CURI, N. Produção e níveis críticos de fósforo do feijoeiro cultivado em solos de várzea. **Ciência & Agrotecnologia**, Lavras, n.5, v.25, p.1133-1141, set./out. 2001.

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

IVANOFF, D.B.; REDDY, R.; ROBINSON, S. Chemical fractionation of organic phosphorus in selected histosols. **Soil Science**, Baltimore, n.1, v. 163, p.36-45, Jan. 1998.

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

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

OBERSON, A.; BESSON, J.M.; MAIRE, N; STICHER, H. Microbiological processes in soil organic phosphorus transformations in conventional and biological cropping systems. **Biology Fertility and Soils**, Berlin, n.3, v.21, p. 138-148, Feb. 1996.

RAIJ, B. VAN. **Fertilidade do solo**. São Paulo: Ceres; Piracicaba: Potafos, 1991. 343 p.

REDDY, K. R.; WANG, Y.; DeBUSK, W.F.; FISHER, M.M.; NEWMAN, S. Forms of soil phosphorus in selected hydrologic units of the Florida Everglades. **Soil Science Society American Journal**, Madison, n.4, v. 62, p. 1134-1147, July/Aug. 1998.

SÁ, J.C.M. **Métodos de preparo e calagem pré-implantação ao plantio direto em um solo dos campos gerais, centro-sul do Paraná: variação das frações de fósforo e resposta do milho**. Paraná: UFP, 1994. 120 p. (Dissertação – Mestrado).

SAS® Instituto Inc., SAS/STAT® User's Guide, Version 6, Fourth Edition, Volume 2, Cary, NC: SAS Institute Inc., 1989, 846p.

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

TIESSEN, H.; SALCEDO, J.H.; SAMPAIO, E.V.S.B. Nutrientes and soil organic matter dynamic under shifting cultivation in semi-arid northeastern Brazil. **Agricultural Ecosystems and Enviroments**, Amsterdam, n.3, v. 38, p. 139-159, Feb. 1992.

WILLIAN, J.D.H.; MAYER, T.; NRIAGER, J.O. Extractability of phosphate minerals common in soils and sediments. **Soil Science of American Journal**, Madison, n.3, v.44, p. 462-465, May/June. 1980.

ANEXOS

ANEXO A	Pág.
TABELA 1A	Quadrados médios de fósforo no solo pelo método Mehlich-1 (P Mehlich-1), teor de fósforo no florescimento (P Florescimento), acúmulo de fósforo na parte aérea (Acúmulo P), matéria seca da parte aérea do feijoeiro (MSPA) e matéria seca de grãos do feijoeiro (MSGR), do solo Organossolo mésico (OY)..... 111
TABELA 2A	Quadrados médios de fósforo no solo pelo método Mehlich-1 (P mehlich-1), teor de fósforo no florescimento (P Florescimento), acúmulo de fósforo na parte aérea (Acúmulo P), matéria seca da parte aérea do feijoeiro (MSPA) e matéria seca de grãos do feijoeiro (MSGR), do solo Gleissolo Melânico (GM)..... 111
TABELA 3A	Quadrados médios de fósforo no solo pelo método Mehlich-1 (P mehlich-1), teor de fósforo no florescimento (P Florescimento), acúmulo de fósforo na parte aérea (Acúmulo P), matéria seca da parte aérea do feijoeiro (MSPA) e matéria seca de grãos do feijoeiro (MSGR), do solo Gleissolo Háptico (GX)..... 112
TABELA 4 A	Quadrados médios de fósforo no solo pelo método Mehlich-1 (P mehlich-1), teor de fósforo no florescimento (P Florescimento), acúmulo de fósforo na parte aérea (Acúmulo P), matéria seca da parte aérea do feijoeiro (MSPA) e matéria seca de grãos do feijoeiro (MSGR), do solo Neossolo Flúvico (RU)..... 112
TABELA 5A	Quadrados médios de capacidade máxima de adsorção fósforo (CMAP), índice tampão de fósforo (ITP), fósforo remanescente (P-rem), pH e Al trocável, do solo Organossolo Mésico (OY)..... 113
TABELA 6A	Quadrados médios de capacidade máxima de adsorção fósforo (CMAP), índice tampão de fósforo (ITP), fósforo remanescente (P-rem), pH e Al trocável, do solo Gleissolo Melânico (GM)..... 113

TABELA 7A	Quadrados médios de capacidade máxima de adsorção fósforo (CMAP), índice tampão de fósforo (ITP), fósforo remanescente (P-rem), pH e Al trocável, do solo Gleissolo Háptico (GX).....	114
TABELA 8A	Quadrados médios de capacidade máxima de adsorção fósforo (CMAP), índice tampão de fósforo (ITP), fósforo remanescente (P-rem), pH e Al trocável, do solo Neossolo Flúvico (RU).....	114
TABELA 9A	Quadrados médios de fósforo lábil, pouco lábil e não lábil, do solo Organossolo Mésico (OY).....	115
TABELA 10A	Quadrados médios de fósforo lábil, pouco lábil e não lábil, do solo Gleissolo Melânico (GM).....	115
TABELA 11A	Quadrados médios de fósforo lábil, pouco lábil e não lábil, do solo Gleissolo Háptico (GX).....	116
TABELA 12A	Quadrados médios de fósforo lábil, pouco lábil e não lábil, do solo Neossolo Flúvico (RU).....	116
TABELA 13A	Modelos ajustados e estimativas dos parâmetros para o P Resina + Pi NaHCO ₃ , Po NaHCO ₃ , Pi NaOH _{0,1+0,5} e Po NaOH _{0,1+0,5} em função da aplicação de esterco bovino (MO) e calcário (Cal), para os solos Organossolo Mésico (OY), Gleissolo Melânico (GM), Gleissolo Háptico (GX) e Neossolo Flúvico (RU).....	117

TABELA 1A Quadrados médios de fósforo no solo pelo método Mehlich-1 (P Mehlich-1), teor de fósforo no florescimento (P Florescimento), acúmulo de fósforo na parte aérea (Acúmulo P), matéria seca da parte aérea do feijoeiro (MSPA) e matéria seca de grãos do feijoeiro (MSGR), do solo Organossolo mésico (OY).

Fontes de variação	P Mehlich-1	P Florescimento	Acúmulo P	MSPA	MSGR
MO	1389,559633**	0,24678875**	7452,8856**	2102,843266**	473,442367**
Cal	755,065608**	0,51253833**	12000,23907**	3213,176405**	941,1315**
MO x Cal	221,327455 ^{ns}	0,16553208**	377,09059 ^{ns}	210,508291*	60,442168 ^{ns}
Erro	134,61859	0,0508833	248,08508	101,83528	34,937248
CV (%)	7,61	13,00	13,61	18,47	20,06

**, * e ^{ns} significativo a 1%, 5% e não significativo pelo teste de F, respectivamente.

TABELA 2A Quadrados médios de fósforo no solo pelo método Mehlich-1 (P mehlich-1), teor de fósforo no florescimento (P Florescimento), acúmulo de fósforo na parte aérea (Acúmulo P), matéria seca da parte aérea do feijoeiro (MSPA) e matéria seca de grãos do feijoeiro (MSGR), do solo Gleissolo Melânico (GM).

Fontes de variação	P mehlich-1	P Florescimento	Acúmulo P	MSPA	MSGR
MO	11120,15782**	2,71739188**	36959,4851**	6373,32857**	978,0722303**
Cal	11175,65444**	1,64502333**	24673,2599**	3922,80817**	1231,817485**
MO x Cal	176,81121 ^{ns}	0,22504104**	1114,5747**	310,36722**	121,465321**
Erro	116,28444	0,07258417	261,2639	61,57888	14,689579
CV (%)	6,21	11,32	11,44	11,47	10,96

**, * e ^{ns} significativo a 1%, 5% e não significativo pelo teste de F, respectivamente.

TABELA 3A Quadrados médios de fósforo no solo pelo método Mehlich-1 (P mehlich-1), teor de fósforo no florescimento (P Florescimento), acúmulo de fósforo na parte aérea (Acúmulo P), matéria seca da parte aérea do feijoeiro (MSPA) e matéria seca de grãos do feijoeiro (MSGR), do solo Gleissolo Háplico (GX).

Fontes de variação	P mehlich-1	P Florescimento	Acúmulo P	MSPA	MSGR
MO	2864,60739*	1,10545187**	8023,98826**	977,740933**	137,612033**
Cal	4723,99102**	0,64275458**	2775,71324**	940,85198**	469,348031**
MO x Cal	124,56614 ^{ns}	0,38637854 ^{ns}	220,8208 ^{ns}	71,293683 ^{ns}	17,489261 ^{ns}
Erro	555,40047	0,23241875	345,59817	38,888613	13,329891
CV (%)	10,35	13,33	13,89	11,03	14,05

**, * e ^{ns} significativo a 1%, 5% e não significativo pelo teste de F, respectivamente.

TABELA 4A Quadrados médios de fósforo no solo pelo método Mehlich-1 (P mehlich-1), teor de fósforo no florescimento (P Florescimento), acúmulo de fósforo na parte aérea (Acúmulo P), matéria seca da parte aérea do feijoeiro (MSPA) e matéria seca de grãos do feijoeiro (MSGR), do solo Neossolo Flúvico (RU).

Fontes de variação	P mehlich-1	P Florescimento	Acúmulo P	MSPA	MSGR
MO	26361,9266**	1,77499875**	22020,91987**	2817,67378**	996,783714**
Cal	5113,3164**	0,880535**	2064,58664**	1029,32811**	621,199491**
MO x Cal	132,3071 ^{ns}	0,18921625*	863,8323**	50,22366 ^{ns}	15,706537 ^{ns}
Erro	239,8093	0,07990333	232,3685	48,60937	12,207593
CV (%)	8,23	10,00	10,5	11,18	10,05

**, * e ^{ns} significativo a 1%, 5% e não significativo pelo teste de F, respectivamente.

TABELA 5A Quadrados médios de capacidade máxima de adsorção fósforo (CMAP), índice tampão de fósforo (ITP), fósforo remanescente (P-rem), pH e Al trocável, do solo Organossolo Mésico (OY).

Fontes de variação	CMAP	ITP	P-rem	pH	Al
MO	59034,3601**	168,0823856**	136,4740625**	0,66925**	0,220625**
Cal	85401,7815**	34,840055**	50,513**	3,0181667**	0,5083333**
MO x Cal	1358,1350 ^{ns}	5,0853498*	1,5387292 ^{ns}	0,1733333**	0,0065625**
Erro	1727,5947	2,0816308	1,5046667	0,00666667	0,00066667
CV (%)	4,84	8,77	6,30	1,58	17,50

**, * e ^{ns} significativo a 1%, 5% e não significativo pelo teste de F, respectivamente.

TABELA 6A Quadrados médios de capacidade máxima de adsorção fósforo (CMAP), índice tampão de fósforo (ITP), fósforo remanescente (P-rem), pH e Al trocável, do solo Gleissolo Melânico (GM).

Fontes de variação	CMAP	ITP	P-rem	pH	Al
MO	2718350,30**	1448,831197**	22,5639375**	0,4308125**	0,11293750**
Cal	888540,30**	350,561011**	51,303125**	3,258125**	0,81666667**
MO x Cal	57000,18*	123,908048*	1,4371875*	0,5114583**	0,0246875**
Erro	25335,71	52,5988	0,6402917	0,00745833	0,0015
CV (%)	5,78	11,51	9,75	1,78	12,10

**, * e ^{ns} significativo a 1%, 5% e não significativo pelo teste de F, respectivamente.

TABELA 7A Quadrados médios de capacidade máxima de adsorção fósforo (CMAP), índice tampão de fósforo (ITP), fósforo remanescente (P-rem), pH e Al trocável, do solo Gleissolo Háplico (GX).

Fontes de variação	CMAP	ITP	P-rem	pH	Al
MO	1909308,743**	83,9086831**	132,6978125**	1,6904375**	0,1196875**
Cal	191971,768**	5,2860017**	110,1454583**	5,88416667**	0,20445833**
MO x Cal	27366,644 ^{ns}	5,031834**	1,9493125 ^{ns}	0,05802083**	0,326875**
Erro	1660,861	1,0887942	1,051875	0,007008333	0,000625
CV (%)	13,58	11,29	3,99	1,62	13,79

**, * e ^{ns} significativo a 1%, 5% e não significativo pelo teste de F, respectivamente.

TABELA 8 A Quadrados médios de capacidade máxima de adsorção fósforo (CMAP), índice tampão de fósforo (ITP), fósforo remanescente (P-rem), pH e Al trocável, do solo Neossolo Flúvico (RU).

Fontes de variação	CMAP	ITP	P-rem	pH	Al
MO	309931,919**	324,733504**	132,6978125**	0,862**	0,053125**
Cal	75490,513**	45,449728**	110,1454583**	8,80145833**	0,082125**
MO x Cal	12505,808 ^{ns}	7,425409*	1,9493125 ^{ns}	0,10041667**	0,017125**
Erro	3816,436	3,587181	1,051875	0,01870833	0,000125
CV (%)	7,13	9,49	3,99	2,28	16,26

**, * e ^{ns} significativo a 1%, 5% e não significativo pelo teste de F, respectivamente.

TABELA 9A Quadrados médios de fósforo lábil, pouco lábil e não lábil, do solo Organossolo Mésico (OY).

Fontes de variação	P lábil	P pouco lábil	P não lábil
MO	640,620295**	13013,41884**	115818,2346**
Cal	431,643903**	10440,06448**	10714,3242**
MO x Cal	27,997916 ^{ns}	477,92738*	2340,7193 ^{ns}
Erro	31,40363	210,625	1591,3671
CV (%)	9,84	4,44	10,46

**, * e ^{ns} significativo a 1%, 5% e não significativo pelo teste de F, respectivamente.

TABELA 10A Quadrados médios de fósforo lábil, pouco lábil e não lábil, do solo Gleissolo Melânico (GM).

Fontes de variação	P lábil	P pouco lábil	P não lábil
MO	607,860796**	22315,05109**	40947,7951**
Cal	128,052441**	7098,02957**	19171,7425**
MO x Cal	105,382713**	2439,48207 ^{ns}	20987,5912**
Erro	24,49552	1647,929	3764,7843
CV (%)	7,33	7,23	5,47

**, * e ^{ns} significativo a 1%, 5% e não significativo pelo teste de F, respectivamente.

TABELA 11A Quadrados médios de fósforo lábil, pouco lábil e não lábil, do solo Gleissolo Háplico (GX).

Fontes de variação	P lábil	P pouco lábil	P não lábil
MO	4359,41238**	2701,5708**	207,152457 ^{ns}
Cal	3550,33422**	4651,99415**	1134,554855*
MO x Cal	164,4919 ^{ns}	73,64766 ^{ns}	310,66059 ^{ns}
Erro	257,44436	352,27574	347,43158
CV (%)	16,64	12,96	16,13

**, * e ^{ns} significativo a 1%, 5% e não significativo pelo teste de F, respectivamente.

TABELA 12A Quadrados médios de fósforo lábil, pouco lábil e não lábil, do solo Neossolo Flúvico (RU).

Fontes de variação	P lábil	P pouco lábil	P não lábil
MO	4311,01417**	18616,54351**	21744,6258**
Cal	1205,01845**	15016,07135**	1445,36564 ^{ns}
MO x Cal	87,24067 ^{ns}	25127,8398**	1599,87804 ^{ns}
Erro	70,36368	506,7782	1055,8305
CV (%)	8,69	7,89	7,69

**, * e ^{ns} significativo a 1%, 5% e não significativo pelo teste de F, respectivamente.

TABELA 13A Modelos ajustados e estimativas dos parâmetros para o P Resina + Pi NaHCO₃, Po NaHCO₃, Pi NaOH_{0,1+0,5} e Po NaOH_{0,1+0,5} em função da aplicação de esterco bovino (MO) e calcário (Cal), para os solos Organossolo Mésico (OY), Gleissolo Melânico (GM), Gleissolo Háplico (GX) e Neossolo Flúvico (RU).

Solo	Frações de P	Modelos e estimativas dos parâmetros
OY	P Res + Pi NaHCO ₃	44,45+1,58*MO+5,2452*Cal
	Po NaHCO ₃	3,7040+0,1285*MO+2,2447*Cal-0,6698*Cal ²
	Pi NaOH _{0,1+0,5}	209,2+8,6054*MO+49,9272*Cal-0,2769*MO ² -9,6211*Cal ² -3,29832*MO*Cal
	Po NaOH _{0,1+0,5}	37,982675+4,075525*MO+11,3063*Cal
GM	P Res + Pi NaHCO ₃	49,74+4,837*MO+15,9085*Cal-0,2625*MO ² -4,3771*Cal ² -1,09532*MO*Cal
	Po NaHCO ₃	3,1039-0,01549*MO+0,62125*Cal+0,01360*MO ² +0,3075*Cal ²
	Pi NaOH _{0,1+0,5}	421,56+18,49*MO+69,6917*Cal-1,26937*MO ² +22,92036*Cal ² -5,07177*MO*Cal
	Po NaOH _{0,1+0,5}	46,2456+0,46631*MO+31,7929*Cal+0,7422*MO ² -13,89086*Cal ²
GX	P Res + Pi NaHCO ₃	65,0549+3,9372*MO+13,3891*Cal
	Po NaHCO ₃	1,1898+0,0946*MO+0,1519*Cal
	Pi NaOH _{0,1+0,5}	81,57095+2,86125*MO+13,622057*Cal
	Po NaOH _{0,1+0,5}	26,5078+2,710096*MO+12,9848*Cal-0,2288*MO ² -4,478227*Cal ²
RU	P Res + Pi NaHCO ₃	66,101+4,0548*MO+20,1897*Cal-5,7246*Cal ²
	Po NaHCO ₃	2,0282-0,01835*MO+0,5567*Cal+0,02058*MO ² -0,1718*Cal ²
	Pi NaOH _{0,1+0,5}	168,7368+5,93477*MO+12,43934*Cal
	Po NaOH _{0,1+0,5}	21,496+13,395*MO+41,5184*Cal-0,7941*MO ² -4,3754*MO*Cal

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)