**RESPOSTA DO FEIJOEIRO (*Phaseolus vulgaris* L.) À
APLICAÇÃO DE FÓSFORO EM SOLOS DE CERRADO**

ARMINDA MOREIRA DE CARVALHO

Engenheira Agrônoma

Orientador: Prof. Dr. TOSHIAKI KINJO

Dissertação apresentada à Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de mestre em Agronomia, Área de Concentração: Solos e Nutrição de Plantas.

PIRACICABA

Estado de São Paulo - Brasil

Outubro - 1991

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Livros da
Divisão de Biblioteca e Documentação - PCAP/USP

C33lr Carvalho, Arminda Moreira de
Resposta do feijoeiro (Phaseolus vulgaris L.) à aplica
ção de fósforo em solos de cerrado. Piracicaba, 1991.
103p. il.

Diss.(Mestre) - ESALQ
Bibliografia.

1. Cerrado - Solo 2. Feijão - Nutrição 3. Fósforo em
feijão I. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz,
Piracicaba

CDD 635.652

**RESPOSTA DO FEIJOEIRO (*Phaseolus vulgaris* L.) À
APLICAÇÃO DE FÓSFORO EM SOLOS DE CERRADO**

ARMINDA MOREIRA DE CARVALHO

Aprovada em: 21/11/91

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Toshiaki Kinjo ESALQ/USP

Prof. Dr. José Leonardo de Moraes Gonçalves ESALQ/USP

Prof. Dr. Ronaldo Ivan Silveira ESALQ/USP

Prof. Dr. Toshiaki Kinjo

Orientador

A DEUS

OFEREÇO

Aos meus pais e irmãos

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ/USP), pela oportunidade de realização deste curso.

À CAPES, pela bolsa de estudo concedida durante o curso.

Ao Centro Nacional de Pesquisa de Arroz e Feijão (CNPAF/EMBRAPA), pelas condições oferecidas para a execução deste trabalho.

Ao Professor Toshiaki Kinjo, pela orientação e apoio.

Aos Pesquisadores Nand Kumar Fagéria e Itamar Pereira de Oliveira, pela excelente orientação profissional e apoio ao desenvolvimento deste trabalho, incentivando meu interesse pela pesquisa.

Ao Professor José Leonardo de M. Gonçalves, pelas sugestões, correções e críticas construtivas.

Aos estatísticos Francisco J. P. Zimmermann e José Ruy P. de Carvalho, pela execução das análises estatísticas.

À Bibliotecária Ceres Maria V. Sandes, pelo auxílio na aquisição de material bibliográfico e na correção das referências.

Aos funcionários dos Laboratórios de Solos e

Análise Foliar do CNPAF/EMBRAPA, pela dedicação e interesse dispensados às análises realizadas.

Aos técnicos agrícolas da área de Fertilidade de Solos e Nutrição de Plantas do CNPAF/EMBRAPA, que colaboraram no desenvolvimento das atividades experimentais.

A Sebastião José de Araújo, pela elaboração das figuras.

Aos amigos Vera Lúcia Gonçalves de Assis e Francisco Neto de Assis, pela dedicação, apoio e agradável convívio.

Aos colegas do Núcleo de Monitoramento Ambiental (NMA/EMBRAPA), pelas contribuições e apoio oferecidos.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, colaboraram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO.....	iii
SUMMARY.....	vi
1. INTRODUÇÃO.....	01
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	05
2.1. Disponibilidade de fósforo em solos de cerrado.....	05
2.1.1. Fósforo solúvel recuperado pelos extratores químicos.....	06
2.1.2. Influência de atributos do solo sobre a disponibilidade de fósforo.....	10
2.1.3. Efeito do tempo de contato sobre disponibilidade de fósforo.....	13
2.1.4. Movimento de fósforo no solo.....	15
2.2. Respostas das plantas à aplicação de fósforo.....	16
2.2.1. Eficiência de absorção de fósforo	18
2.2.2. Níveis críticos de fósforo na planta.....	21
2.3. Níveis críticos de fósforo no solo.....	26
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	31
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	39

4.1. Fósforo solúvel recuperado pelo extrator.....	38
4.2. Parâmetros de produção.....	44
4.3. Absorção de fósforo pelo feijoeiro.....	53
4.3.1. Concentração e acumulação na parte aérea.....	53
4.3.2. Interação entre fósforo solúvel e concentração de nutrientes na parte aérea.....	64
4.3.3. Eficiência de recuperação de fósforo.....	68
4.3.4. Níveis críticos de fósforo na parte aérea do feijoeiro.....	70
4.4. Níveis críticos de fósforo no solo.....	73
4.5. Classes de teores de fósforo no solo.....	78
5. CONCLUSÕES.....	83
6. LITERATURA CITADA.....	86

RESPOSTA DO FEIJOEIRO (*Phaseolus vulgaris* L.) À APLICAÇÃO
DE FÓSFORO EM SOLOS DE CERRADO

Autora: ARMINDA MOREIRA DE CARVALHO

Orientador: Prof. Dr. TOSHIAKI KINJO

RESUMO

Um experimento foi conduzido em casa de vegetação para avaliar a relação dos parâmetros da planta (produção de matéria seca aos 35 e 90 dias, produção de grãos, número de vagens por planta, número de grãos por vagem, peso de 100 grãos) com doses crescentes de P (0, 25, 50, 100, 200 e 400 mg.kg⁻¹) aplicadas a 4 solos (LRd, LEd, LVd, AQd) apresentando 61%, 63%, 37% e 14% de argila, respectivamente.

Incubaram-se as amostras dos solos durante 7,0 dias, após os quais foram executadas as análises químicas e realizado o plantio do feijão.

O primeiro corte das plantas foi feito aos 35 dias após o plantio para avaliar a produção de matéria seca e a concentração de fósforo e de outros nutrientes na parte aérea do feijoeiro.

Na colheita determinou-se o número de vagens por 2 plantas, o número de grãos por vagem, a produção de

grãos, o peso de 100 grãos, a produção de matéria seca e a concentração de fósforo e de outros nutrientes na parte aérea das plantas.

Os teores de fósforo extraído por Mehlich-1 foram maiores nos solos mais arenosos (AQd e LVd).

Os incrementos nas doses de fósforo influenciaram significativamente os parâmetros da planta avaliados. Nos solos LRd e LEd, a produção de matéria seca (35 e 90 dias) foi o parâmetro que melhor relacionou com o fósforo aplicado e extraído, enquanto que no LVd e na AQd, a produção de grãos também apresentou relações elevadas.

O fósforo solúvel influenciou negativamente as concentrações dos elementos, N, Zn e Cu, na parte aérea do feijoeiro.

A eficiência de recuperação de fósforo pela planta foi menor na AQd, ao considerar as doses mais baixas de P aplicado.

Os níveis críticos de fósforo determinados na planta e no solo apresentaram relação inversa com os teores de argila dos solos estudados. Os solos mais argilosos (LRd e LEd) exigiram as menores quantidades de fósforo em todas as classes de teores, para a produção de grãos.

RESPONSE OF COMMON BEAN (*Phaseolus vulgaris* L.) TO
APPLICATION OF PHOSPHORUS IN CERRADO SOILS

Author: ARMINDA MOREIRA DE CARVALHO

Adviser: Prof. Dr. TOSHIAKI KINJO

SUMMARY

A green house experiment was carried out to evaluate the relationship of bean plant parameters (dry matter production at 35 and 90 days, grain production, number of pods per plant, number of grains per pods and 100 grains weight) with increasing levels of phosphorus (0, 25, 50, 100, 200 and 400 mg P.kg⁻¹) applied to four soils (LRd, LEd, LVd, AQd) with 61%, 63%, 37% and 14% of clay, respectively.

Soil sample were incubated in seven days. After this period of incubation chemical and routine analysis of elements were made and bean was sown.

The first plants cut was made 35 days after sowing, in order to evaluate dry matter production, concentration of phosphorus and other nutrients in the above ground part of bean plants.

The number of pods per plant, the number of grains per pods, the grain yield, the weight of 100 grains,

matter production, concentration of phosphorus and other nutrients were determined, at harvest.

Phosphorus recovered by Mehlich-1 extractant were higher in the sandy soils (AQd and LVd).

The increments in the phosphorus doses influenced significantly the parameters of the plant evaluated. In the LRd and LEd soils, the dry matter production (35 and 90 days) presented the better relationship with applied and extractable phosphorus.

Phosphorus extractable influenced negatively the concentrations of N, Zn and Cu in the above ground parts of the bean plants.

The efficiency of phosphorus uptake by plant was less in the quartzous sandy soil (AQd) for the lower doses.

The critical levels determined in the plant and in the soils presented an inverse relationship with the clays contents in the soils studied. Soils high in clay content (LRd and LEd) required the less quantities of phosphorus for bean production.

1. INTRODUÇÃO

O feijão (Phaseolus vulgaris L.), dentre as leguminosas, é o grão mais consumido diretamente pelos povos da África e da América Latina. O Brasil é um dos maiores produtores mundiais, apresentando, entretanto, produtividades médias inferiores a 500 kg.ha^{-1} (FAO, 1984).

Tradicionalmente, os pequenos produtores usando tecnologias rudimentares, têm sido os responsáveis pelo maior volume da produção, mas com rendimentos muito baixos. O aspecto nutricional, exceto nas áreas de elevada fertilidade natural, representa uma das principais limitações, visto que, na maioria dos casos não são aplicados adubos e corretivos.

A situação está começando a modificar-se, devido a um novo sistema de cultivo irrigado de outono-inverno, denominado de terceira época ou plantio de inverno. Neste sistema de plantio os riscos são bem menores, já que a cultura requer elevados investimentos e tecnologias mais avançadas. Além disso, os problemas decorrentes das enfermidades são reduzidos, pois as

condições climáticas não favorecem a ocorrência de pragas e principalmente de doenças.

Os solos sob vegetação de cerrados ocupam no Brasil aproximadamente 200 milhões de hectares, correspondendo a 23% do território nacional (GOEDERT, 1989). Nesta área e em outras regiões tropicais, a baixa disponibilidade de fósforo (total e solúvel) associada à acidez e toxidez de alumínio é o principal fator que limita a nutrição e o rendimento do feijoeiro. Cerca de 60% da área cultivável com feijão na América Central (FASSBENDER, 1967) e toda área sob vegetação de cerrado no Brasil são deficientes em fósforo. Um levantamento das condições de fertilidade, executado em áreas cobertas com vegetação de cerrado, mostrou que 92% das amostras da camada superficial (0-15 cm) dos solos representativos da região apresentavam teores de fósforo extraído por Mehlich-1 inferiores a 2 ppm (LOPES & COX, 1977).

A baixa disponibilidade de fósforo na solução destes solos está associada, principalmente, aos atributos resultantes da intemperização intensa dos mesmos. Os mais comumente relacionados são: teor e natureza dos minerais de argila, teor de colóides amorfos, óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, alumínio trocável e pH.

Portanto, uma parcela significativa dos solos brasileiros, além de possuir teores muito baixos de fósforo disponível às plantas, apresenta elevada capacidade

de retenção do fosfato aplicado, reduzindo a eficiência da adubação fosfatada.

Embora o fósforo seja exigido em quantidades relativamente pequenas pelo feijoeiro, o fornecimento do mesmo é essencial à cultura, pela sua importância no metabolismo energético e nas reações biossintéticas da planta (RDSOLEM, 1987). Na determinação dos teores a serem fornecidos através da adubação fosfatada, as metodologias devem considerar os atributos de cada solo relacionados à retenção de fósforo.

Os estudos sobre disponibilidade de fósforo em solos de cerrados são amplos e extensos, mas insuficientes para solucionar a complexidade de fatores que influenciam as respostas das plantas à adubação fosfatada. Os trabalhos que relacionam respostas do feijoeiro ao fósforo com atributos dos solos são escassos. Considerando a expansão desta cultura em um novo sistema de cultivo, torna-se necessário oferecer soluções aos problemas que limitam sua produtividade. Assim, o conhecimento das quantidades de fósforo necessárias à planta, em cada tipo de solo, tem importância significativa.

O presente trabalho teve como objetivos:

- 1- Avaliar o comportamento do feijoeiro cultivado em diferentes solos sob vegetação de cerrado com aplicação de doses crescentes de fósforo;

- 2- Determinar as concentrações críticas na

parte aérea das plantas, aos 35 dias;

3- Determinar os níveis críticos de fósforo pelo extrator Mehlich-1, nos solos testados;

4- Estabelecer as classes de teores de fósforo, para os diferentes intervalos de produção relativa de grãos.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Disponibilidade de Fósforo em Solos de Cerrado:

O teor de fósforo total nos solos sob vegetação de cerrado é baixo e sua disponibilidade está comprometida pela elevada capacidade que estes solos apresentam em retê-lo. Geralmente a concentração de fósforo na solução é inferior a 0,1 ppm. Com a aplicação de adubos fosfatados, o P-solução aumenta, mas a maior parte é adsorvida às partículas coloidais ou precipita-se, formando compostos menos solúveis. Parte da parcela adsorvida, permanece como P-lábil, em equilíbrio com o P-solução e a outra parte é adsorvida de forma não lábil, podendo ou não ser aproveitada pelas plantas (GOEDERT et alii, 1986; RAIJ, 1983).

As formas de fósforo (P-solução, P-lábil, P-não lábil), podem ser expressas pelos fatores intensidade, quantidade e capacidade, que conceitualmente representam a disponibilidade de fósforo às plantas. O fator intensidade refere-se à concentração do elemento na solução do solo, o

fator quantidade ao P-lábil e o fator capacidade ou poder tampão do solo é a capacidade que o solo tem de restabelecer o fósforo na solução em níveis adequados. A difusão também está ligada à disponibilidade de fósforo às plantas, já que é o processo responsável pelo movimento deste elemento até à superfície das raízes (RAIJ, 1983).

O fósforo solúvel é avaliado através dos extratores químicos, os quais devem simular ao máximo a extração feita pelas plantas, representando o sistema P-Solo-Planta.

2.1.1. Fósforo Solúvel Recuperado Pelos Extratores Químicos

É necessário que o extrator de fósforo simule a ação das plantas, através da determinação do P-lábil e do P-solução, sem atacar o P-não lábil ou resíduos de fertilizantes que não dissolveram no solo (RAIJ et alii, 1987).

Existe um número bastante elevado de métodos de extração de fósforo, refletindo a complexidade de comportamento deste elemento no solo. As mais variadas soluções (água, soluções tamponadas de ácido fraco, soluções diluídas de ácido forte, soluções tamponadas de bases e soluções de sais diversos), têm sido testadas com várias combinações de concentrações, pH, relação

solução: solo, tempo de agitação e outros (RAIJ, 1983).

Os extratores Mehlich-1 (H_2SO_4 0,025N + HCl 0,05 N) e IAC (H_2SO_4 0,05 N), comumente utilizados nos laboratórios brasileiros, extraem mais fósforo ligados ao cálcio e as partes mais solúveis de P associadas ao ferro e alumínio. Além disso, por serem ácidos apresentam o inconveniente de redissolverem resíduos de fosfatos naturais (formas não lábeis), que não dissolveram no solo (BARBOSA FILHO, 1986; CABALA & SANTANA, 1983; FEITOSA & RAIJ, 1976; GOEDERT & LOBATO, 1980; RAIJ, 1983).

Atualmente, a resina trocadora de íons, introduzida através do Instituto Agronômico de Campinas (RAIJ & QUAGGIO, 1983), é a técnica de extração de fósforo mais utilizada no Estado de São Paulo e está sendo adotada pelos laboratórios brasileiros. Experimentalmente ela apresentou as melhores correlações com as plantas, estando sua eficiência ligada ao fato de representar melhor as condições nas quais é feita a extração pelas raízes, à medida em que é contínua, com a transferência do fósforo da fase sólida para a resina feita através da água, de modo semelhante ao que ocorre com a absorção pelas raízes (HISLOP & COOKE, 1966; RAIJ et alii, 1987).

Compararam-se métodos de extração de fósforo (Bray 1, Bray 2, Mehlich e IAC), em diferentes solos do Estado de São Paulo, os quais foram posteriormente correlacionados com produção de matéria seca e teores de

fósforo total em plantas de feijão e milho. Os extratores determinados como mais eficientes foram IAC e Mehlich (NEPTUNE & PEREZ, 1987; PEREZ & NEPTUNE, 1987; PEREZ & NEPTUNE, 1988).

Os extratores são também utilizados em trabalhos de fracionamento de formas inorgânicas de fósforo por serem mais específicos a um determinado tipo de composto de fósforo (ANDERSON, 1975; FERREIRA et alii, 1978; PÉRES MÉNDEZ et alii, 1978; RAIJ, 1983; SÁ et alii, 1974; SMITH, 1970).

Estudou-se o efeito de fontes de fósforo (Superfosfato Triplo e Fosfato Parcialmente Acidulado de Araxá), da calagem e do tempo de incubação, sobre transformação de P, nos solos LEd e LVd. As transformações foram avaliadas através do fracionamento de P e do P recuperado por diferentes extratores (Mehlich-1, Olsen + EDTA, Bray 1 e Resina). Os resultados mostraram alterações nas frações de P em função das fontes aplicadas e também que os teores do elemento não variaram com o tempo de incubação, mas sim com a calagem, nos dois solos. Os extratores Mehlich-1, Olsen + EDTA e Bray 1 extraíram predominantemente P-Fe, e a aplicação de SFT aumentou a extração de fósforo pelos métodos Olsen + EDTA, Bray 1 e resina. Este último método extraiu preferencialmente a fração de fósforo ligada ao alumínio. A maior extração de P com Mehlich-1 nas amostras tratadas com FAPS, confirma o

fato de que este extrator dissolve resíduos de fosfatos naturais não disponíveis às plantas (BARBOSA FILHO et alii, 1987).

BRAGA & DEFELIPO (1972), verificaram correlações do fósforo "extraível" pelos métodos Bray-1 e Bray-2 com a fração P-Fe, em solos que sofreram calagem. Observaram ainda que os extratores Mehlich-1, Bray-1 e Bray-2 correlacionaram-se com P-Al, em solos com e sem calcário, e que o extrator Olsen correlacionou-se apenas com P-Al em amostras nas quais não foi aplicado calcário.

A associação dos fatores poder tampão de P, % de argila, fósforo extraído por Mehlich-1, Bray-1 e Olsen resultaram na melhor relação com a resposta de soja à adubação fosfatada, em solos com diferentes características físicas e químicas, sob condições de campo (MIRANDA & VOLKWEISS, 1981).

Parâmetros de crescimento de aveia foram relacionados com índices de disponibilidade de fósforo (potencial de fosfato monocálcico, capacidade tampão de fósforo, formas inorgânicas de fósforo e P-disponível obtido pelos extratores Bray-1, IAC, Mehlich e Olsen), em 20 Latossolos do Estado de Minas Gerais, sob condições de casa de vegetação. Observaram-se relações significativas apenas da forma inorgânica P-Al com a produção de matéria seca e com a absorção de fósforo pela planta (BAHIA FILHO & BRAGA, 1975b).

Segundo HOLFORD & MATTINGLY (1979), o extrator, assim como o sistema radicular da planta, extrai uma quantidade de fosfato, que é função direta do P-lável e inversa da capacidade tampão do solo.

Além dos extratores, outros aspectos, como a capacidade tampão do solo, devem ser considerados na avaliação da disponibilidade de fósforo às plantas.

2.1.2. Influência de Atributos do Solo Sobre a Disponibilidade de Fósforo

A disponibilidade do fósforo na solução está relacionada aos atributos do solo que refletem os fatores quantidade e capacidade. Têm sido constatadas relações significativas entre características do solo e medidas da capacidade tampão de fosfato ou outros parâmetros que expressam o fator capacidade. Dentre estas características, foram observadas correlações com: teor de argila (BAHIA FILHO e BRAGA, 1975b; LOPES & COX, 1979; NOVAIS & KAMPRATH, 1979), matéria orgânica (BAHIA FILHO, 1982; BAHIA FILHO & BRAGA, 1975a; LOPES & COX, 1979), capacidade de campo, superfície específica do solo, declividade da relação variação de P-disponível/variação de P-adicionado e P-concentração de equilíbrio (NOVAIS & KAMPRATH, 1979). Nos solos de cerrado, os principais atributos que refletem o fator capacidade, responsáveis pela retenção de fósforo

são: acidez, natureza e teor de argila, conteúdo de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, alumínio trocável e matéria orgânica (BRAGA, 1978; SANCHES & UERARA, 1980).

O valor da sorção máxima de fosfato variou diferentemente com o pH em dois Latossolos (LRd e LEd), no Estado de Mato Grosso. No LRd o decréscimo da sorção acompanhou o aumento do pH, enquanto que no LEd, diminuiu até o pH 6,5, voltando a aumentar no pH 7,0. A dessorção foi determinada nas seguintes condições de pH: natural, 6,0, 6,5 e 7,0. Os solos manifestaram comportamento diferenciado em relação a este fenômeno, para os diferentes valores de pH, além de decréscimo do mesmo com as sucessivas extrações, não comprovando porém, a sugestão de que as maiores dessorções estão associadas aos menores valores da energia de ligação (VASCONCELOS et alii 1974; VASCONCELOS et alii, 1975).

Informações relativas ao fator capacidade de fósforo do solo, como adsorção máxima, CTF (Capacidade tampão de fósforo), equivalente de umidade, teor de argila, fósforo recuperado por diferentes extratores químicos, são de grande importância para interpretação dos resultados referentes ao fósforo na análise de solo (NOVAIS & KAMPRATH, 1979).

Foram encontradas correlações altamente significativas entre adsorção de fosfato e teores de óxidos amorfos de alumínio, nos horizontes A de solos sob

vegetação de cerrado do Planalto Central, o mesmo não ocorrendo com os elevados teores de óxi-hidróxidos de ferro. Considerou-se bastante provável a existência de correlação entre a adsorção aniônica e os compostos de ferro, caso fossem também incluídos dados do horizonte B (LEAL & VELLOSO, 1973).

Características físicas, químicas e mineralógicas de amostras superficiais de solos sob vegetação de cerrado de Minas Gerais e Goiás foram correlacionadas com os parâmetros adsorção máxima e capacidade tampão de fósforo. As correlações com a percentagem de argila e de matéria orgânica foram elevadas. Apesar dos menores valores, também foram obtidas correlações com cargas positivas, compostos de Al_2O_3 (total e amorfo) e de Fe_2O_3 (total e livre), características do solo determinadas por ataque sulfúrico (Al_2O_3 "total" e Fe_2O_3 "total") e com alumínio trocável. Este último elemento apresentou o mais baixo coeficiente de correlação e as correlações com os compostos de ferro foram menores do que com os de alumínio (LOPES & COX, 1979).

A goethita foi o principal componente da fração argila responsável pelas variações entre solos observadas por BAHIA FILHO (1982) na capacidade tampão máxima e na adsorção máxima de fósforo.

BAHIA FILHO et alii (1983), relacionaram adsorção máxima de fosfato com atributos de solos que

apresentavam diferenças quanto à textura e composição mineralógica. O parâmetro correlacionou-se com teor de argila e de carbono, equivalente de umidade e água retida a $-1/3$ de bar, mostrando que a extensão da superfície disponível para adsorção é variável nos diferentes solos segundo suas características.

Compararam-se a retenção de fósforo no subsolo e na camada superficial, constatando maior efeito deste fenômeno no subsolo do que na superfície do solo, embora as duas camadas apresentassem textura e composição mineralógica semelhantes. Este comportamento foi atribuído aos teores mais elevados de matéria orgânica na camada superficial, que através do bloqueio das hidroxilas expostas na superfície dos óxidos de ferro e alumínio pelo seus radicais livres, reduziu a capacidade de retenção de fósforo (FOX & KAMPRATH, 1970).

2.1.3. Efeito do Tempo de Contato Sobre a Disponibilidade de Fósforo

O tempo de contato entre o fósforo adicionado e o solo também exerce influência sobre a disponibilidade deste elemento às plantas. Geralmente a velocidade de reação entre os mesmos é rápida no início, decrescendo com o tempo de equilíbrio, até tornar-se constante.

A retenção de fósforo ao longo do tempo foi avaliada em vinte e duas amostras superficiais de solos da Nigéria Ocidental, com diferentes propriedades físicas e químicas. Observou-se decréscimo rápido do fósforo remanescente nos primeiros dias e mais lento com o passar do tempo, até tornar-se constante aos 84 dias após início da incubação. No primeiro dia de incubação o fósforo correlacionou-se negativamente com percentagem de matéria orgânica, argila e óxidos de ferro e alumínio. Os teores de argila e matéria orgânica apresentaram melhores correlações no período inicial de incubação, sendo a correlação máxima obtida com a argila no primeiro dia, mostrando a importância da mesma na fase inicial do processo de retenção. As correlações com óxidos de ferro e alumínio mostraram aumentos acentuados nos primeiros sete dias, tornando-se então constantes. No primeiro dia, os óxidos de alumínio correlacionaram-se melhor do que óxidos de ferro (AYODELE & AGBOLA, 1981).

GONÇALVES et alii (1985), estudando a cinética de adsorção de fósforo em dez solos de cerrado do Estado de Minas Gerais, observaram que a velocidade de adsorção é dependente do tipo de solo, decrescendo com o aumento do tempo de equilíbrio.

Amostrás de Latossolo Vermelho Escuro foram incubadas com doses crescentes de fósforo, por um período de 80 dias e extrações periódicas executadas através do

método de Mehlich-1. Este solo apresentou elevada capacidade de retenção de fósforo (77 a 90%), a qual reduziu com o tempo, mostrando mais uma vez a relação negativa entre retenção de fósforo e tempo de reação entre o elemento e o solo (FAGÉRIA & BARBOSA FILHO, 1987).

2.1.4. Movimento de Fósforo no Solo

O movimento do fósforo no solo é muito lento e ocorre predominantemente por difusão (BARBER, 1962; OLSEN et alii, 1962). Este fator representado pelas características que permitem aos íons fosfatos migrarem da superfície das partículas do solo, onde dissolvem-se, até a superfície das raízes, relaciona-se também com a disponibilidade de fósforo às plantas (RAIJ, 1983).

A quantidade de fósforo que chega à superfície das raízes depende da concentração do elemento na solução, do sistema radicular e do teor de água no solo (GOEDERT et alii, 1986). Assim vários trabalhos são desenvolvidos relacionando a difusão de fósforo com os seguintes parâmetros: doses aplicadas, atributos e conteúdo de água do solo.

MAHTAB et alii (1971) verificaram aumento no coeficiente de difusão com a aplicação de fósforo e com a elevação nos teores de argila e de água, em solos com diferentes texturas. A relação positiva entre fósforo

solúvel e teores de argila contraria resultados obtidos por outros autores. Uma possível justificativa seria o fato dos solos argilosos apresentarem originalmente quantidades elevadas de fósforo total.

SILVEIRA & MOREIRA (1990), estudando o efeito interativo entre doses de fósforo e lâminas de água sobre a produtividade do feijoeiro, observaram respostas mais acentuadas à aplicação da água do que às doses de fósforo, conseguindo porém, um mesmo rendimento a partir de diferentes combinações entres estes dois fatores.

RUIZ (1986) ao relacionar nível crítico de P na soja e disponibilidade de água em solos com diferentes texturas, também observou maiores respostas desta cultura à aplicação de água do que ao fósforo.

Na maioria dos trabalhos citados anteriormente, constatou-se efeito mais acentuado do estress hídrico sobre a disponibilidade de fósforo, nos solos arenosos, demonstrando a necessidade de uma suplementação bem maior de fósforo para uma mesma redução no teor de água disponível, nestes solos.

2.2. Respostas das Plantas à Aplicação de Fósforo

A produção de matéria seca em diferentes períodos de crescimento e a produção de grãos são parâmetros utilizados com frequência em trabalhos que avaliam respostas das plantas à aplicação de nutrientes. No caso do feijoeiro, utiliza-se ainda os seguintes componentes da produção: número de vagens por planta, número de sementes por vagem e peso de sementes (FAGÉRIA et alii, 1991).

A quantidade de fósforo no solo ou na planta capaz de proporcionar rendimento máximo ou percentuais deste é determinada relacionando as produções de matéria seca ou de grãos (absoluta ou relativa) com o fósforo recuperado por um método específico, no caso do solo, e com a concentração deste elemento, na planta. Estas determinações são denominadas níveis críticos, podendo ser fisiológicos ou econômicos (MALAVOLTA, 1989; SUMNER, 1979).

Em função dos fatores ligados à planta, existem diferenças entre espécies e até cultivares quanto ao aproveitamento do fósforo. Algumas características da planta são responsáveis pelas melhores respostas à aplicação deste elemento, tais como: ciclo longo, sistema radicular bem desenvolvido, capacidade de absorção de cálcio, capacidade das raízes de acidificarem a rizosfera, infecção com micorrizas aumentando a superfície de absorção

das raízes, presença da enzima fosfatase ácida e outros (RAIJ, 1983).

A maioria das culturas respondem à aplicação de fósforo nos solos sob vegetação de cerrado, devido à baixa disponibilidade deste elemento nos mesmos.

MALAVOLTA (1972), analisando ensaios de adubação com a cultura do feijoeiro, conduzidos no Brasil, observou um grande número de respostas à aplicação de fósforo.

O fósforo é o nutriente que tem apresentado as maiores e mais frequentes respostas, quando fornecido ao feijoeiro, apesar de exigido em quantidades relativamente pequenas por esta cultura (ROSOLEM, 1987).

FAGÉRIA (1990) observou resposta linear para cultivares de arroz, até o nível de 80% da produção relativa, justificando a necessidade de uma adubação pesada. Quando a produção atingiu a faixa de 80 a 100%, o autor recomendou uma adubação moderada, visando manter ou elevar os teores de fósforo no solo. Segundo o autor, acima de 100% de produtividade, não são esperados incrementos significativos desta, sendo a quantidade do elemento adequada à cultura.

Estas respostas variam de acordo com os atributos dos solos responsáveis pela manutenção do P-solução e com as características das plantas que possibilitam maior ou menor eficiência de absorção e/ou

utilização deste elemento. Tais fatores influenciam a determinação dos níveis críticos no solo e na planta.

2.2.1. Eficiência de Absorção de Fósforo

A eficiência de absorção ou recuperação, que representa a quantidade de nutriente absorvido em relação àquela existente no solo e adicionado a ele ou a outro meio de crescimento é influenciada por fatores genéticos, ambientais e do próprio solo. Espécies, cultivares e genótipos dentro de espécies, interagem com o ambiente resultando em diferenças na absorção e/ou utilização dos elementos (BALIGAR et alii, 1990).

Além dos fatores genéticos da planta, a extensão do sistema radicular, o conteúdo de água e a concentração do elemento na solução do solo, influenciam a absorção de fósforo, cujo movimento ocorre predominantemente por difusão. A concentração deste elemento na solução é mantida por fatores do solo que regulam o equilíbrio entre P-lábil e P-solução (GOEDERT et alii, 1986).

FAGÉRIA & BALIGAR (1989), comparando espécies de cereais e leguminosas, observaram grande variabilidade na eficiência de absorção de fósforo tanto entre famílias quanto entre espécies avaliadas. As leguminosas foram mais responsivas ao fósforo, necessitando

maior suplementação deste elemento do que os cereais.

Níveis de saturação de alumínio e fósforo solúvel foram combinados em solo de cerrado (LEd), com a finalidade de avaliar a eficiência na utilização deste nutriente por quinze cultivares de feijão. Todas as cultivares apresentaram aumentos no rendimento diretamente proporcionais à disponibilidade de fósforo e reduções com aumentos na saturação de alumínio (MESQUITA FILHO et alii, 1982).

Avaliaram-se a eficiência na utilização de fósforo por 289 cultivares de feijão, com base na produção de grãos, em ensaios de campo. As cultivares foram classificadas da seguinte forma: 19% eficientes e responsivas, 25% eficientes e não responsivas, 29% não eficientes e responsivas e 27% não eficientes e não responsivas (OLIVEIRA et alii, 1987).

Dos atributos do solo, os mais comumente relacionados com eficiência de recuperação de fósforo são aqueles que estão ligados à capacidade tampão de fósforo, como o teor de argila.

MUNIZ (1983) observou correlações inversas entre as taxas de recuperação de fósforo por plantas de soja e características do solo que refletem o fator capacidade. Houve decréscimo na taxa de recuperação de 11,4%, em um solo com menor teor de argila (16%), para 2,10%, no solo que apresentou valor mais elevado para este

parâmetro (66% de argila). FONSECA (1987) também obteve correlações significativas negativas entre estas variáveis, indicando que quanto maior o fator capacidade, menor a taxa de recuperação do fósforo aplicado.

A produção de matéria seca e a absorção de fósforo por cultivares de feijão aumentaram com a capacidade tampão do solo. A eficiência de utilização de fósforo relacionou-se negativamente com as doses aplicadas. Verificaram-se ainda diferenças entre solos e cultivares quanto à absorção deste elemento (GOMES & BRAGA, 1980).

2.2.2. Níveis Críticos de Fósforo na Planta

Os conceitos de níveis críticos na planta são bastante variados. Para FRITZ (1976), o nível crítico de um elemento na planta, ou concentração crítica, é a concentração mínima deste nutriente quando o crescimento máximo ou percentual deste é atingido, correspondendo mais a uma estreita zona de transição do que a um ponto definido. DOW & ROBERTS (1982) também consideram como faixa crítica e não nível crítico, e definem-a como a faixa acima da qual a planta é amplamente suprida e abaixo da qual ocorre deficiência do nutriente. Segundo Sumner & Lott et alii, citados por FAGÉRIA (1984), nível crítico refere-se à concentração de um nutriente na planta, amostrada em determinado estágio de crescimento, no qual ocorre uma

redução de 5 a 10% no rendimento máximo. MALAVOLTA et alii (1989) definem nível crítico ou nível crítico fisiológico, como teores associados com intensidade máxima de processos definidos e nível crítico fisiológico-econômico como a faixa de teores do elemento, abaixo da qual a colheita cai e acima da qual a adubação não é mais econômica.

FAGÉRIA (1976), propôs os seguintes limites entre níveis deficientes, críticos, adequado e tóxico de nutrientes em plantas.

- deficiente: produção relativa < que 80%;
- crítico: produção relativa entre 80 e 90%;
- adequado: produção relativa entre 90 e 100%;
- tóxico: produção relativa > 100%.

Uma série de fatores da planta, do solo e meio ambiente influenciam a determinação do nível crítico. BATES (1971), relacionou os seguintes: idade e tecido da planta, espécie e/ou variedade, níveis e interação entre nutrientes, umidade do ar e do solo, temperatura e luz.

Ao determinar níveis críticos para diferentes cultivares de arroz em vários estádios de crescimento, FAGÉRIA (1987) verificou redução em seus valores com a idade da planta, variando de 0,2% a 0,3% do peso da matéria seca, na fase vegetativa e de 0,12% a 0,18% na fase reprodutiva. Estas variações podem ser atribuídas ao efeito de diluição. Não foram observadas porém, diferenças entre cultivares, em todos os estádios de

crescimento .

Observaram-se diferenças no incremento da produtividade, entre três cultivares de feijão, com aplicação de níveis crescentes de fósforo, sob condições de casa de vegetação (FAGÉRIA, 1989).

FEITOSA et alii (1980) encontraram em amostras da terceira folha de feijão cultivado com irrigação, nível crítico de 0,33%, no período do florescimento.

Wilcox & Fagéria, citados por OLIVEIRA & THUNG (1988), apresentaram os níveis de P situados entre 0,25 e 0,5%, como adequados ao feijoeiro,.

Segundo MALAVOLTA et alii (1989), a faixa adequada de fósforo em folhas de feijoeiro varia de 0,2 a 0,3%.

Foram encontrados valores de 0,18 e 0,16% para os níveis críticos na parte aérea das leguminosas Galactia striata e Stylosanthes guianenses, respectivamente (CARVALHO et alii, 1989).

A concentração crítica de fósforo na planta também é influenciada pela capacidade-tampão do solo (MUNIZ et alii, 1985). Os autores estudando amostras de dez solos com diferentes valores do fator capacidade-tampão, encontraram correlações negativas entre as concentrações críticas de fósforo na parte aérea da soja e as características do solo que refletem o fator capacidade.

NEVES et alii (1986) ao estudarem concentrações críticas de fósforo na matéria seca da parte aérea de eucalipto, cultivadas em amostras de dez latossolos, encontraram valores entre 0,15 e 0,19%. Estas concentrações correlacionaram-se negativamente com as seguintes características indicadoras do fator capacidade: teor de argila, equivalente de unidade e adsorção máxima de fósforo.

FABRES (1986), cultivando alface em amostras de seis latossolos, verificou elevações das concentrações críticas de fósforo na parte aérea das plantas, de 0,40% para 0,61%, quando os teores de argila decresceram de 76% para 15%.

FONSECA (1987) observou uma tendência bastante consistente de aumentos nas concentrações críticas de fósforo, na parte aérea de gramíneas forrageiras com a redução dos teores de argila.

A interação com outros nutrientes também influencia a determinação de respostas da planta ao fósforo. Um dos efeitos mais conhecidos é a interação do fósforo com zinco, não sabendo exatamente se ela ocorre no solo ou na planta. Existem algumas evidências de que a reação na planta é mais indicada para explicar tal interação, como: (LOPEZ-G, 1972; MALAVOLTA, 1980; OLSEN, 1972)

- insolubilização do zinco pelo fósforo na superfície das

raízes, reduzindo sua absorção;

- menor translocação de zinco das raízes para parte aérea, provavelmente devido à precipitação deste elemento no xilema como fosfato de zinco insolúvel;

- simples efeito de diluição da concentração de Zn na parte aérea, pela resposta no crescimento à aplicação de fósforo;

- distúrbios metabólicos nas células da planta, provocados pelo desequilíbrio entre fósforo e zinco ou interferência da concentração excessiva de fósforo na função metabólica do zinco.

No solo uma possível explicação é a redução na absorção do zinco, provocada pela inibição não competitiva com o fósforo (LOPEZ-G, 1972).

ADRIANO et alii (1971) atribuíram o antagonismo entre fósforo e zinco ao efeito indireto do cálcio associado aos fertilizantes fosfatados,

FAGÉRIA & ZIMMERMANN (1979) responsabilizaram a interação entre fósforo e zinco, pelo efeito depressivo das doses elevadas de fósforo e calcário, sobre produção e componentes de produção de arroz.

Observaram-se em dois solos de Minas Gerais, reduções nos teores de zinco na presença de fósforo, em folhas e caules de milho e o inverso nas raízes. Este fato indica que a interação $P \times Zn$ ocorreu principalmente nas raízes, reduzindo a translocação do zinco para a parte

aérea (BAHIA FILHO & BRAGA, 1974).

FAGÉRIA (1989) verificou em experimento de casa de vegetação, reduções nas concentrações de zinco, na parte aérea e de cobre, na parte aérea e raízes do feijoeiro, com os aumentos nas doses de fósforo aplicadas ao solo.

Estudos mostraram efeitos sinérgicos de N sobre absorção de P, o qual foi relacionado com decréscimo no pH da rizosfera, aumento da solubilidade dos fosfatos do solo, aumento no crescimento radicular e na capacidade fisiológica das raízes em absorver fósforo (SMITH & JACKSON, 1987; BAR-TAL et alii, 1990).

2.3. Níveis Críticos de Fósforo no Solo

No solo, considera-se como nível crítico o teor mínimo disponível de um nutriente, capaz de possibilitar a máxima eficiência no crescimento vegetal (FONSECA, 1987).

Segundo FOX & KAMPRATH (1970); OZANNE & SHAW (1967), o nível ótimo de fósforo varia com a composição granulométrica do solo, espécies vegetais e estádios de crescimento.

Apesar da variabilidade dos resultados em campo e casa de vegetação, geralmente ao relacionar níveis críticos e textura verifica-se que os valores aumentam com

a redução nos teores de argila.

MUNIZ (1983), em ensaio de casa de vegetação com dez latossolos, encontrou níveis críticos de fósforo para soja de 9,8 e 23,5; 24,5 e 53,5; 29,3 e 69,6 mg.kg^{-1} de P, respectivamente, pelos extratores Mehlich-1, Bray-1 e Bray-2, quando os teores de argila reduziram de 66% para 16%. NEVES (1983) ao cultivar estas mesmas amostras com eucalipto, observou tendência semelhante nos valores dos níveis críticos, com algumas variações influenciadas pela natureza da argila.

Produções máximas de *Panicum miliaceum* (painço) foram obtidas com aplicação de 300 a 400, 175 a 300 e 175 mg.kg^{-1} de P, em três solos sob cerrado do Estado de Goiás, com 23,5; 50,2 e 37,3% de argila, respectivamente (ALMEIDA NETO & BRASIL SOBRINHO, 1977).

BAHIA FILHO (1982) também verificou relações negativas entre níveis críticos e teores de argila, ao cultivar milho em amostras de latossolos do Estado de Minas Gerais. Ao encontrar valor mais alto em um solo argiloso, o autor apresentou como possível justificativa o teor elevado de matéria orgânica (5,3%).

VIDOR & FREIRE (1971); FREIRE et alii (1979) chegaram às mesmas relações entre níveis críticos e teores de argila, citadas anteriormente, ao cultivar soja em solos com diferentes texturas.

Resultados semelhantes aos anteriores foram

obtidos no estudo da variação de fósforo disponível em solos submetidos a cultivos sucessivos com milho. Constatou-se ainda, que após o sexto cultivo, um solo com 42,2% de argila assegurava altas produções, com $8,1 \text{ mg.kg}^{-1}$ de fósforo, obtidos pelo extrator Mehlich-1, enquanto que no solo com 5,4% de argila, $27,9 \text{ mg.kg}^{-1}$ recuperados pelo mesmo extrator, não foram suficientes para manter uma produção satisfatória (NOVAIS, 1977).

Atingiram-se níveis críticos bastante elevados em ensaio de casa de vegetação, ao cultivar alface com aplicação de doses entre 0 e 1000 mg.kg^{-1} de P, em latossolos. Os valores obtidos pelos extratores Mehlich-1 e Bray-1 foram os seguintes: 315 e 411; 296 e 329; 306 e 296; 274 e 336; 143 e 93; 277 e 247 mg.kg^{-1} de P, respectivamente, para solos com teores de argila de 15, 28, 30, 32, 55 e 67% (FABRES, 1986). O autor sugere que estes elevados valores foram causados pela baixa eficiência na absorção e/ou utilização de fósforo da espécie. Segundo FONSECA (1987), as elevadas doses de fósforo e de outros nutrientes aplicadas, também podem explicar os altos valores obtidos.

GONÇALVES et alii (1986) encontraram valores elevados de níveis críticos de fósforo no solo pelo extrator de Mehlich-1, ao cultivar mudas de eucalipto. Estes valores variaram de 60 a 100 mg.kg^{-1} e apresentaram relação inversa com os teores de argila.

Alguns resultados entretanto mostram relações diretas entre níveis críticos de fósforo e teores de argila no solo (LEITE, 1984; FONSECA, 1987). Para FONSECA (1987) o aumento do nível crítico com os teores de argila resulta basicamente da metodologia usada, segundo a qual aplica-se os tratamentos em função da capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAF) de cada solo. Na metodologia clássica, geralmente aplica-se as mesmas doses de fósforo para solos com diferentes atributos.

Em condições de campo, OLIVEIRA et alii (1987) encontraram para máxima produção do feijoeiro, doses entre 514 e 595 Kg/ha em ensaios das águas e 577 e 642 Kg/ha de P_2O_5 na época seca, equivalentes a 112 e 130 $mg.kg^{-1}$, e 126 e 140 $mg.kg^{-1}$ de P, respectivamente. Estas altas doses requeridas para o máximo rendimento físico, foram atribuídas à estabilização de produção do feijoeiro em altos níveis de fósforo, ocorrendo decréscimo apenas em níveis muito altos de fertilização.

FAGÉRIA (1989), estudando o efeito da aplicação de doses crescentes de fósforo para três cultivares de feijão, em casa de vegetação, encontrou produções máximas na faixa de 125 a 150 Kg/ha de P_2O_5 , em função da cultivar, correspondendo a valores entre 27,31 e 32,77 $mg.kg^{-1}$ de P.

GOEPFERT (1972) relatou nível crítico de 18 $mg.kg^{-1}$ de P, em solo do Rio Grande do Sul, cultivado com

feijão, enquanto KORNELIUS et alii (1976) encontraram para 80 % da produção máxima desta cultura, 35 mg.kg^{-1} de P no solo.

A interação entre nível crítico de fósforo no solo e saturação de alumínio foi avaliada para cinco cultivares de feijão e quatro de trigo. Observaram-se grandes variações de tolerância ao Al e do nível crítico de fósforo, entre as variedades de cada cultura. As variedades de feijão, Rico Pardo e Dicol, atingiram 80% do seu rendimento máximo com 12 mg.kg^{-1} de P, sugerindo uma maior capacidade de utilizar o elemento em relação às outras variedades, as quais produziram bem com 28 mg.kg^{-1} de P (MIRANDA & LOBATO, 1978).

NEVES (1983) considera que o conhecimento dos níveis críticos de um nutriente no solo para uma espécie vegetal ou grupos de espécies com características semelhantes, fundamenta-se não apenas em suas exigências nutricionais variáveis, mas também nas diferenças entre eficiências de absorção e/ou utilização do nutriente.

A maioria dos trabalhos sobre níveis críticos em solos cultivados com feijoeiro, como aqueles analisados anteriormente, não relacionam este parâmetro com os atributos do solo que o influencia.

3. MATERIAL E MÉTODOS:

Selecionaram-se solos representativos da região de cerrados, com base nas variações texturais determinadas através da análise granulométrica (Tabela 1). Os teores de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 foram obtidos por ataque sulfúrico, segundo metodologia da EMBRAPA (1979) e a composição mineralógica estimada pelas relações moleculares $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (Ki) (Tabela 2).

Após a identificação e a caracterização dos solos, coletaram-se amostras representativas dos grupos selecionados, na camada superficial (0-30 cm), em municípios do Estado de Goiás situados geograficamente na região de cerrado (Tabela 1).

Depois da secagem, do peneiramento em malha de 2,0 mm de abertura e da homogeneização, retiraram-se amostras dos solos para análise química (Tabela 2).

A quantidade de calcário a ser aplicada foi calculada com base na curva de calibração desenvolvida para elevar e uniformizar o $\text{pH}_{\text{CaH}_2\text{O}}$ em torno de 6,0. Após 15 dias de incubação com as respectivas doses de calcário

Tabela 1. Classificação, composição granulométrica e local de coleta das amostras dos solos em estudo.

Tipo de Solo	Composição Granulométrica				Local
	Areia Grossa	Areia Fina	Silte	Argila ^(*)	
	-----%				
Latossolo Roxo (LRd)	8,0	17,0	14,0	61,0	Itumbiara
Latossolo Vermelho-Escuro (LEd)	11,0	17,0	9,0	63,0	Morrinhos
Latossolo Vermelho-Amarelo (LVd)	14,0	44,0	5,0	37,0	Água Limpa
Areia Quartzosa (AQd)	44,0	37,0	5,0	14,0	D. Federal

(*) Método da Pipeta.

calcítico, os solos receberam níveis crescentes de fósforo (0, 25, 50, 100, 200 e 400 mg.kg⁻¹ de P); aplicados na forma de superfosfato triplo. A adubação de plantio foi uniforme, adicionando a cada vaso de 6,0 kg: 400 mg de N ((NH₄)₂SO₄), 960 mg de K (KCl), 200 mg de Mg (MgSO₄.7H₂O) e 1000 mg de FTE BR-12 (Zn=9,2%; B=2,2%; Cu=0,8%; Fe=3,7; Mn=3,4; Mo=0,1) como fonte de micronutrientes. A adubação de cobertura foi feita aos 35 dias após o plantio, aplicando-se 420 mg de N por vaso, através do sulfato de amônio (FAGÉRIA, 1989).

Os solos foram recolocadas nos vasos com os respectivos tratamentos, permanecendo durante sete dias, para maior estabilizaçãodas reações entre o fósforo e o solo. Após este período, retiraram-se amostras para análises química (Tabela 3) e de fósforo dos diversos tratamentos e executou-se a semeadura.

Tabela 2. Resultados das análises químicas dos solos.

Análises	Solos			
	LRd	LEd	LVd	AQd
pH H ₂ O (1:2,5)	5,20	5,90	5,00	5,20
P (mg.kg ⁻¹)(1)	0,40	0,50	0,70	0,60
K (meq/100ml)(1)	0,04	0,12	0,06	0,02
Ca (meq/100ml)(2)	0,70	2,30	0,20	0,10
Mg (meq/100ml)(2)	0,10	0,20	0,25	0,20
Al (meq/100ml)(2)	0,30	0,20	1,00	0,70
H+Al (meq/100ml)(3)	6,60	6,43	5,94	4,12
S (meq/100ml)	0,74	2,62	1,26	0,22
T _{pH=7,0} (meq/100ml)	7,34	9,05	7,20	4,34
Cu (mg.kg ⁻¹)(1)	5,40	2,60	1,30	0,20
Fe (mg.kg ⁻¹)(1)	41,00	65,00	81,00	130,00
Mn (mg.kg ⁻¹)(1)	33,00	35,00	16,00	5,00
Mat. Orgânica (%) (4)	2,00	2,40	1,60	1,40
Sat. de Bases (%)	10,10	29,00	17,50	5,10
Sat. de Alumínio (%)	29,00	7,10	44,20	76,10
SiO ₂ "total" (%) (5)	10,20	11,20	8,60	3,5
Al ₂ O ₃ "total" (%) (6)	25,20	26,19	13,00	6,5
Fe ₂ O ₃ "total" (%) (7)	19,12	15,19	7,72	3,5
Ki (8)	0,68	0,72	1,10	0,92
Kr (9)	0,23	0,27	0,41	0,68

(1) Extrator Mehlich-1 (HCL 0,05 N + H₂SO₄ 0,0125 N).

(2) Extrator KCl 1 N.

(3) Extrator Acetato de Cálcio 1 N.

(4) Oxidação da matéria orgânica por solução de bicromato de potássio.

(5) SiO₂ total obtido por ataque sulfúrico.

(6) Al₂O₃ total obtido por ataque sulfúrico.

(7) Fe₂O₃ total obtido por ataque sulfúrico.

(8) Relação molecular SiO₂/Al₂O₃.

(9) Relação molecular SiO₂/Al₂O₃ + Fe₂O₃.

As análises químicas seguiram metodologia da EMBRAPA (1979), sendo o fósforo solúvel extraído pelo método de Mehlich-1 e determinado colorimetricamente, após reação com molibdato de amônio e ácido ascórbico.

O experimento foi instalado em casa de vegetação, com 4 repetições dos tratamentos, dispostos num fatorial 4 X 6 (quatro solos e seis doses de P), no delineamento inteiramente casualizado. Foram semeadas sete sementes do cultivar de feijão EMGOPA-202 Rubi em cada vaso. Após oito dias fez-se o desbaste, deixando quatro plântulas por vaso. O teor de água foi mantido em torno da capacidade de campo durante todo o ciclo da cultura e periodicamente realizou-se o rodízio dos vasos.

Aos 35 dias após o plantio, executou-se o primeiro corte da parte aérea de duas plantas, rente ao solo. O material colhido foi colocado para secar em estufa com ventilação forçada a 70°C, até peso constante, triturado em moinho tipo Wiley, mineralizado e analisado. A mineralização foi feita com mistura nítrico-perclórica 2:1 e a concentração de fósforo na digestão determinada colorimetricamente. Além do fósforo, analisaram-se os seguintes nutrientes: N, K, Ca, Mg, Zn, Cu, Mn e Fe.

Conduziu-se o experimento até a fase de maturação, quando as vagens e a parte aérea das duas plantas que restaram do primeiro corte foram colhidas. Em

Tabela 3. Análises químicas dos solos, após receberem os respectivos tratamentos com fósforo.

Solos	Doses de P	pH (H ₂ O)	K	Ca	Mg	H+Al	S	T	Cu	Fe	Mn	V
	-mg. kg ⁻¹ -											
	0	6,3	0,6	3,4	0,5	3,9	4,5	8,4	7,1	33,5	40,0	53
	25	6,3	0,6	3,6	0,7	4,0	4,8	8,8	7,1	33,0	43,0	54
LRd	50	6,3	0,6	3,5	0,6	4,1	4,7	8,8	7,1	32,0	44,0	53
	100	6,3	0,6	3,6	0,6	4,1	4,7	8,8	7,1	32,0	44,0	54
	200	6,3	0,6	3,7	0,8	4,7	5,1	9,8	7,0	33,0	46,0	52
	400	6,2	0,5	4,1	0,9	4,9	5,5	10,4	6,8	33,0	38,0	53
	0	6,0	0,7	3,8	0,9	5,0	5,4	10,4	3,3	49,0	32,0	52
	25	6,0	0,7	3,8	0,9	4,8	5,4	10,2	3,3	50,0	32,0	53
LEd	50	6,0	0,7	3,8	1,0	4,8	5,4	10,2	3,5	50,0	31,0	53
	100	5,9	0,7	4,2	1,0	4,9	5,9	10,8	3,4	51,0	31,5	55
	200	5,9	0,7	4,1	1,0	5,6	5,8	11,4	3,3	51,0	31,0	51
	400	5,9	0,7	4,7	1,0	5,8	6,4	12,2	3,2	52,0	31,0	52
	0	5,6	0,6	2,8	0,7	4,7	4,1	8,8	2,4	54,0	15,0	47
	25	5,6	0,6	2,8	0,8	4,5	4,2	8,7	2,3	54,0	15,0	48
LVd	50	5,6	0,6	2,8	0,9	4,9	4,3	9,2	2,2	57,0	15,5	47
	100	5,6	0,6	2,9	0,9	4,5	4,4	8,9	2,1	56,0	14,2	49
	200	5,6	0,6	3,1	0,1	4,9	4,7	9,6	2,3	57,0	15,0	49
	400	5,5	0,6	3,5	0,8	5,6	4,9	10,5	2,2	57,0	15,2	46
	0	6,1	0,5	2,1	0,6	2,1	3,2	5,3	1,0	64,2	3,0	61
	25	6,1	0,6	2,2	0,6	2,3	3,3	5,6	1,0	67,0	3,0	59
	50	6,1	0,6	2,2	0,5	2,3	3,3	5,6	1,3	72,7	3,0	58
AQd	100	6,0	0,5	2,3	0,6	2,4	3,4	5,8	1,2	78,5	3,0	59
	200	6,0	0,6	2,5	0,7	2,7	3,7	6,4	1,3	78,2	4,0	58
	400	5,9	0,6	2,9	0,7	3,2	4,2	7,4	1,4	77,0	4,0	57

seguida determinaram o número de vagens, o número e o peso de grãos de cada parcela, além do peso de 100 grãos. O total de grãos foi dividido pelo número de vagens dos respectivos vasos, resultando em um número médio de grãos por vagem. O corte, a digestão e a análise química da parte aérea das plantas seguiram o mesmo processo descrito para os 35 dias.

Amostras de solos foram retiradas de cada vaso, após a colheita, para análise de fósforo através da metodologia citada anteriormente.

Efetuaram-se análises de variância conjunta e para cada solo separadamente, testando através de contrastes, os modelos de regressão aos quais melhor ajustavam-se os parâmetros de planta ou de solo avaliados.

Foram determinados coeficientes de correlação linear simples entre o fósforo solúvel e os parâmetros da planta, incluindo a concentração de nutrientes na parte aérea do feijoeiro.

As variáveis, produções de matéria seca aos 35 e 90 dias, produção de grãos com seus componentes, concentração e acumulação de fósforo na parte aérea do feijoeiro foram relacionadas com as doses de fósforo aplicadas aos solos testados, através de equações de regressão.

Determinou-se graficamente, nos solos LRd e AQd, a concentração crítica de fósforo na parte aérea das

plantas, aos 35 dias, para atingir 90% da produção de matéria seca. Os níveis críticos de fósforo nos solos em estudo, para produção de 90% de matéria seca aos 35 dias, foram calculados através do modelo $ax + bx^{1/2} + c$. A produção relativa de grãos também foi relacionada com o fósforo solúvel nos solos sob vegetação de cerrado, através deste modelo de regressão, estabelecendo as classes de teores de fósforo para: 0-70% de produção relativa; 70 a 90% e acima de 90%.

Estimou-se a quantidade de fósforo retida nos diversos solos subtraindo das doses aplicadas, as quantidades recuperadas pelo extrator e absorvidas pela planta. O resultado foi dividido pelo fósforo aplicado e expresso em percentagem. Para o plantio considerou-se apenas o fósforo extraído nesta fase, enquanto que na colheita, foram utilizados o fósforo recuperado na mesma e ainda aquele absorvido pela planta (parte aérea e grãos).

Para estimar a eficiência de absorção de fósforo pelas plantas aplicou-se a seguinte fórmula (BALIGAR et alii, 1990):

$$[(\text{Absorção de P com a dose aplicada} - \text{Absorção de P na testemunha}) / \text{dose aplicada}] \times 100$$

As variações das respostas do feijoeiro às doses aplicadas de fósforo, nos solos testados, foram relacionadas com atributos dos mesmos, principalmente teor de argila.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Fósforo Solúvel Recuperado pelo Extrator

Os teores médios de fósforo (Tabela 4), mostram efeito significativo do incremento nas doses deste elemento, para os dois períodos avaliados. Observam-se diferenças acentuadas quanto à quantidade de fósforo solúvel, entre os solos testados.

A interação significativa, entre doses aplicadas e solos, verificada em relação ao fósforo extraído (Tabela 5), indica o efeito de atributos do solo sobre a disponibilidade do elemento avaliado. Os solos mais argilosos, LRd e LEd, com 61% e 63% de argila, respectivamente, apresentaram os valores mais baixos de fósforo recuperado, sendo que no LRd estes teores foram ainda menores, principalmente para as doses mais elevadas. Na AQd e no LVd, com os teores mais baixos de argila (14% e 37%), extraíram-se as maiores quantidades de fósforo. Este comportamento, em relação à textura dos solos, manifestou-se nos dois períodos de incubação. Na colheita,

Tabela 4. Fósforo extraído nos solos testados, para as diferentes doses aplicadas, em dois períodos.

Solos	Doses de P	Período de Extração	
		Plantio	Colheita
	-----mg. kg ⁻¹ -----	-----mg. kg ⁻¹ -----	
LRd	0	0,70	0,50
	25	3,47	1,07
	50	5,17	1,75
	100	16,25	4,75
	200	28,20	9,82
	400	87,25	23,72
<hr/>			
Teste F (1)			
Doses		103,91**	69,03**
Contraste (1)			
Linear		502,71**	341,40**
Quadrático		14,81**	3,39 ^{ns}
Coef. de Variação (%)		27,41	30,94
<hr/>			
LEd	0	1,00	0,67
	25	3,30	0,72
	50	10,17	1,60
	100	27,62	2,72
	200	49,10	11,63
	400	136,65	58,70
<hr/>			
Teste F (1)			
Doses		180,90**	115,65**
Contraste (1)			
Linear		886,67**	547,95**
Quadrático		14,91**	27,80**
Coef. de Variação (%)		20,20	30,86

Continuação da Tabela 4

Tabela 4. Fósforo extraído nos solos testados, para as diferentes doses aplicadas, em dois períodos.

Solos	Doses de P	Período de Extração	
		Plantio	Colheita
	-----mg. kg ⁻¹ -----	-----mg. kg ⁻¹ -----	
LVd	0	0,87	1,47
	25	6,52	2,02
	50	19,00	3,47
	100	30,25	10,60
	200	93,30	36,72
	400	291,85	103,07
<hr/>			
Teste F (1)			
Doses		149,93**	50,43**
Contraste (1)			
Linear		719,91**	243,94**
Quadrático		29,34**	7,70*
Coef. de Variação (%)		24,83	42,88
<hr/>			
AQd	0	0,97	1,42
	25	14,77	3,75
	50	16,30	7,92
	100	32,77	19,87
	200	89,52	67,67
	400	241,90	136,07
<hr/>			
Teste F (1)			
Doses		131,29**	58,97**
Contraste (1)			
Linear		639,58**	291,32**
Quadrático		16,05**	0,64 ^{ns}
Coef. de Variação (%)		24,20	35,22

(1) ** significativo ao nível de 1% de probabilidade; * significativo ao nível de 5% de probabilidade; ^{ns} não significativo.

os teores de fósforo recuperado foram bem menores do que no plantio, devido à maior retenção resultante do tempo de contato entre este elemento e o solo e à absorção pela planta. A relação negativa entre teor de argila e fósforo solúvel é conhecida e já foi observada em vários trabalhos desenvolvidos anteriormente (BAHIA FILHO, 1982; BAHIA FILHO & BRAGA, 1975a; LOPES & COX, 1979; NOVAIS & KAMPRATH, 1979; SANCHES & UERARA, 1980).

Tabela 5. Análise de variância conjunta, para o fósforo recuperado no plantio e na colheita do feijoeiro.

Tratamentos	Fósforo Recuperado	
	Plantio	Colheita
Teste F (1)		
Solo (S)	77,05**	57,41**
Dose (D)	479,51**	182,07**
SxD	30,71**	17,97**
Contraste (1)		
Linear	2328,53**	892,21**
Quadrático	68,54**	13,85**
Coef. de Variação (%)	26,12	42,79

(1) ** significativo ao nível de 1% de probabilidade; * significativo ao nível de 5% de probabilidade; ns não significativo.

Na Tabela 6 são apresentados os valores estimados da retenção de fósforo para os quatro solos, nos dois períodos de incubação.

Os solos mais argilosos (LRd e LEd) apresentaram maiores percentagens de fósforo retido em relação aos mais arenosos (LVd e AQd), comprovando a relação negativa entre disponibilidade de fósforo e teores

Tabela 6. Fósforo retido para as diferentes doses aplicadas, em dois períodos, baseando-se no fósforo recuperado pelo extrator e pela planta.

Solos	Doses de Fósforo	Fósforo Recuperado		Fósforo (1) Absorvido	Fósforo Retido(2)	
		Plantio	Colheita		Plantio	Colheita
		mg. kg ⁻¹			%	
LRd	0	0,70	0,50	0,12	-	-
	25	3,47	1,07	5,63	86,12	73,20
	50	5,17	1,75	7,74	89,66	81,02
	100	16,25	4,75	12,05	83,75	83,20
	200	28,20	9,82	14,67	85,90	87,75
	400	87,25	23,72	18,66	78,19	89,40
LEd	0	1,00	0,67	0,22	-	-
	25	3,30	0,72	6,30	86,80	71,92
	50	10,17	1,60	10,43	79,60	75,94
	100	27,62	2,72	14,37	72,38	82,91
	200	49,10	11,63	14,31	75,45	87,03
	400	136,65	58,70	19,55	65,84	80,44
LVd	0	0,87	1,47	0,49	-	-
	25	6,52	2,02	6,49	73,92	65,96
	50	19,00	3,47	12,35	62,00	68,36
	100	30,25	10,60	15,66	69,75	73,74
	200	93,30	36,72	19,83	53,35	71,72
	400	291,85	103,07	21,97	27,04	68,74
AQd	0	0,97	1,42	0,18	-	-
	25	14,77	3,75	3,57	40,92	70,72
	50	16,30	7,92	7,28	67,40	69,60
	100	32,77	19,87	11,40	67,23	68,73
	200	89,52	67,67	16,08	55,24	58,12
	400	241,90	136,07	26,05	39,53	59,47

(1) refere-se às quantidades absorvidas, determinadas na parte aérea e nos grãos, divididas pela quantidade de solo dos respectivos vasos.

(2) $PR(Plantio) = (PA - PE(Plantio)) / PA \times 100$

$PR(colheita) = [PA - (PE(colheita) + PP)] / PA \times 100$, onde;

PR= Fósforo retido;

PA= Fósforo aplicado;

PE= Fósforo recuperado pelo extrator;

PP= Fósforo recuperado pela planta

de argila. Esta relação foi obtida, devido à elevada capacidade que o fósforo apresenta para reagir, por adsorção e/ou precipitação, com óxidos hidratados de ferro e alumínio e caulinita, componentes predominantes na fração argila dos solos sob vegetação de cerrados. Assim, parte do elemento aplicado permanece na forma de P-lábil em equilíbrio com o P-solução e o restante transforma-se em P-não lábil, cujo aproveitamento pelas plantas é incerto (GOEDERT et alii, 1986; RAIJ, 1983).

Os solos testados apresentaram baixa relação molecular $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (K_i), refletindo um processo intenso de intemperização. Considerando os valores de 0,68; 0,72; 1,10 e 0,92, encontrados para o parâmetro K_i , nos solos LRd, LEd, LVd e AQd, respectivamente, é provável que a gibsita seja o constituinte dominante na fração argila dos solos LRd e LEd e que a caulinita e a gibsita predominam no LVd e na AQd. A natureza mineralógica destes componentes favorece as reações de adsorção e/ou precipitação citadas anteriormente, contribuindo para aumentar a capacidade de retenção de fósforo nos quatro solos.

A variação entre o fósforo retido aos 7 e 97 dias, nos solos mais argilosos e nas menores doses, apresentou uma tendência de acompanhar resultados obtidos por outros autores (AYODELE & AGBOLA, 1981; FAGÉRIA & BARBOSA FILHO, 1987; GONÇALVES et alii, 1985), segundo os quais a velocidade de reação do elemento aplicado ao solo é

rápida no início e decresce com o tempo de equilíbrio. Os altos teores de argila e as doses mais baixas de fósforo favorecem a rápida ocupação dos sítios de adsorção, devido à elevada energia disponível para a reação.

As variações nos teores de fósforo solúvel, observadas entre os solos estudados, podem ser explicadas principalmente pelas suas diferenças de composição granulométrica. A natureza mineralógica, estimada pelo valor K_i , também influenciou estes resultados.

4.2. Parâmetros de Produção

A Tabela 7 apresenta as médias de produção de matéria seca aos 35 e 90 dias após o plantio, e de produção de grãos com seus respectivos componentes. O Peso de 100 grãos, o número de vagens por vaso e o número de grãos por vagem, avaliados neste trabalho, são considerados por outros autores (FAGÉRIA et alii, 1991), como parâmetros que expressam bem a produção. O peso de matéria seca em diferentes períodos de crescimento, também citado neste trabalho, mostra correlação significativa com a produção de grãos.

Os valores de matéria seca (35 e 90 dias) apresentados pela testemunha foram extremamente baixos e os de produção e seus componentes nulos. Tais resultados devem-se aos teores originais de fósforo muito baixos nos

solos em estudo. Os aumentos nas doses de fósforo influenciaram significativamente todos os parâmetros da planta, nos solos testados (Tabela 7). A produção de matéria seca apresentou relação direta com as doses aplicadas, nos dois períodos, exceto para as plantas cultivadas no solo LVd, as quais manifestaram aos 90 dias, um decréscimo neste parâmetro, ao elevar de 200 mg.kg^{-1} para 400 mg.kg^{-1} a dose de fósforo aplicada. A produção de grãos acompanhou o comportamento da matéria seca, porém não foi reduzida no LVd, ao aumentar de 200 para 400 mg.kg^{-1} a dose de P aplicada.

As plantas cultivadas nos solos LRd e LEd, com aplicação de 400 mg.kg^{-1} de P, mostraram, aos 90 dias, quantidades mais elevadas de matéria seca em relação àquelas cultivadas nos solos LVd e AQd, porém, apresentaram menor produção de grãos. Nos solos LVd e AQd, provavelmente, as condições físicas e químicas desfavoráveis, anteciparam a maturação do feijoeiro, contribuindo com a queda precoce das folhas. Este comportamento foi mais acentuado na dose de 400 mg.kg^{-1} de P, refletindo uma condição de estress, estimulada pelos elevados teores de fósforo solúvel dos solos mais arenosos. Entretanto, as características físicas e químicas desfavoráveis não chegaram a prejudicar a formação dos grãos, considerando que as plantas cultivadas nos solos LVd e AQd, com aplicação de 400 mg.kg^{-1} de P,

Tabela 7. Produção de matéria seca e de grãos com os respectivos componentes de produção, para as diferentes doses de fósforo, nos solos testados.

Solos	Doses de Fósforo	Peso Seco de Parte Aérea	Peso de Grãos	Peso de 100 Grãos	Vagens/Vaso	Grãos/Vagem
		35 (dias) 90				
	--mg. kg ⁻¹ --	-----g/vaso-----		--g--		
	0	0,52	0,35	0,00	0,00	0,00
	25	2,05	2,57	9,42	22,90	4,55
LRd	50	2,72	3,77	15,47	25,20	4,47
	100	4,32	5,30	16,67	25,57	4,10
	200	6,65	5,50	19,75	24,62	4,30
	400	7,80	12,47	23,25	26,87	4,37
Teste F (1)						
Doses		187,20**	112,94**	65,16**	181,21**	84,67**
Contraste (1)						
Linear		814,75**	528,18**	209,33**	229,63**	164,88**
Quadrático		118,19**	0,08 ^{ns}	64,88**	207,02**	126,08**
C. de Var. (%)		10,18	15,55	14,60	7,34	9,05
	0	0,70	0,77	0,00	0,00	0,00
	25	1,70	3,10	13,62	23,85	4,77
LEd	50	2,35	4,55	18,47	26,15	4,40
	100	4,32	5,97	19,55	26,60	4,32
	200	6,47	7,12	18,65	26,72	4,42
	400	7,97	13,22	24,90	27,70	4,57
Teste F (1)						
Doses		114,72**	36,74**	113,76**	537,34**	324,89**
Contraste (1)						
Linear		515,96**	174,83**	292,39**	677,48**	527,41**
Quadrático		56,66**	0,81 ^{ns}	81,02**	698,67**	359,18**
C. de Var. (%)		13,62	24,31	10,12	4,26	4,45

continuação da Tabela 7

Tabela 7. Produção de matéria seca e de grãos com os respectivos componentes de produção, para as diferentes doses de fósforo, nos solos testados.

Solos	Doses de Fósforo	Peso Seco de Parte Aérea		Peso de Grãos	Peso de 100 Grãos	Vagens/ Vaso	Grãos/ Vagem
35 (dias) 90							
	—mg. kg ⁻¹ —	—g/vaso—		—g—			
	0	0,70	0,45	0,00	0,00	0,00	0,00
	25	1,82	2,87	13,00	22,35	13,00	4,45
Lvd	50	2,70	3,77	19,35	26,40	16,50	4,45
	100	5,10	5,87	19,57	26,37	16,75	4,42
	200	7,05	12,05	21,57	28,92	17,00	4,40
	400	7,00	9,45	29,92	29,10	20,75	5,02
Teste F (1)							
Doses		62,85**	40,58**	58,26**	146,74**	91,00**	223,80**
Contraste (1)							
Linear		232,05**	128,12**	194,84**	235,50**	152,62**	261,95**
Quadrático		80,70**	67,86**	30,12**	211,42**	99,80**	223,80**
C. de Var. (%)		16,85	23,69	15,27	8,29	8,42	4,23
	0	0,73	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00
	25	1,40	1,27	5,30	24,47	5,75	3,90
AQd	50	2,20	1,87	10,50	22,77	20,25	4,30
	100	4,37	3,52	16,00	24,65	15,00	4,30
	200	6,83	5,97	19,92	25,20	18,25	4,30
	400	8,25	7,27	30,65	29,05	21,25	5,00
Teste F (1)							
Doses		122,23**	57,60**	51,00**	60,52**	59,83**	115,00**
Contraste (1)							
Linear		546,29**	261,19**	232,59**	101,90**	179,41**	159,08**
Quadrático		62,40**	26,11**	13,93**	52,18**	80,51**	124,65**
C. de Var. (%)		13,98	21,03	22,34	12,85	11,77	5,88

(1) ** significativo ao nível de 1% de probabilidade; * significativo ao nível de 5% de probabilidade; ns não significativo.

apresentaram maior produção (Tabela 7).

Comparando as produções de grãos obtidas com as doses mínima (25 mg.kg^{-1}) e máxima (400 mg.kg^{-1}) aplicadas, foram observados aumentos de: 146,81%, 82,82%, 130,15% e 478,3%, nos solos, LRd, LEd, LVd e AQd, respectivamente. Embora o feijoeiro necessite de quantidades relativamente pequenas de fósforo, estas respostas à sua aplicação são esperadas, principalmente em solos sob vegetação de cerrado (ROSOLEM, 1987).

A análise de variância (Tabela 8) indicou interação entre doses aplicadas e solos, para os seguintes parâmetros de planta: peso seco da parte aérea aos 90 dias, produção de grãos e número de vagens por vaso. Este

Tabela 8. Aplicação do teste F e contraste para produção e componentes de produção de feijoeiro considerando os tratamentos e suas interações.

Tratamentos	Peso Seco de Parte Aérea		Peso de Grãos	Peso de 100 Grãos	Vagens/ Vaso	Grãos/ Vaso
	35	(dias) 90				
Teste F (1)						
Solo (S)	0,29 ^{ns}	24,06 ^{**}	11,02 ^{**}	2,82 [*]	6,32 ^{**}	0,91 ^{ns}
Dose (D)	421,80 ^{ns}	174,34 ^{**}	237,27 ^{**}	521,55 ^{**}	360,63 ^{**}	760,98 ^{**}
SxD	1,62 ^{ns}	8,05 ^{**}	4,58 ^{**}	1,58 ^{ns}	3,41 ^{**}	1,10 ^{ns}
Contraste (1)						
Linear	181,25 ^{**}	813,17 ^{**}	855,70 ^{**}	762,30 ^{**}	781,34 ^{**}	806,14 ^{**}
Quadrático	293,68 ^{**}	51,18 ^{**}	139,95 ^{**}	620,87 ^{**}	465,04 ^{**}	820,58 ^{**}
C. de Var. (%)	13,88	22,32	15,79	8,67	8,68	4,56

(1) ** significativo ao nível de 1% de probabilidade; * significativo ao nível de 5% de probabilidade; ^{ns} não significativo.

resultado mostra que os atributos do solo estão

influenciando a resposta do feijoeiro à aplicação de fósforo no caso das variáveis citadas.

O peso de matéria seca aos 35 e 90 dias, a produção de grãos e o número de vagens por planta correlacionaram com o fósforo extraído no plantio (Tabela 9), nos quatro solos. Nos solos LRd e LEd, as correlações positivas mais elevadas foram obtidas com produção de matéria seca, aos 35 e 90 dias. No LVd, a produção de matéria seca aos 35 dias e a produção de grãos, apresentaram os maiores valores de correlações. As correlações das produções de matéria seca (35 e 90 dias) e de grãos com o fósforo extraído foram altas e semelhantes na AQd.

Utilizaram-se equações de regressão para relacionar os parâmetros da planta com o fósforo adicionado ao solo (Tabela 10). A produção de matéria seca aos 35 e 90 dias apresentou coeficientes de determinação mais elevados nos solos LRd, LEd e LVd, demonstrando maior eficiência deste parâmetro, nos dois períodos, para explicar a resposta da planta ao fósforo. Na AQd, a produção de grãos demonstrou eficiência semelhante à matéria seca produzida aos 35 e 90 dias.

Analisando os resultados referentes às correlações e regressões, discutidos anteriormente,

Tabela 9. Coeficiente de correlação linear simples⁽¹⁾ entre as produções de matéria seca, grãos e respectivos componentes e o fósforo recuperado pelo extrator.

Solos	Parâmetros	Fósforo Recuperado	
		Plantio	Colheita
LRd	Produção de Matéria Seca aos 35 Dias	0,839**	0,862**
	Produção de Matéria Seca aos 90 Dias	0,933**	0,940**
	Produção de Grãos	0,688**	0,718**
	Peso de 100 Grãos	0,422**	0,429**
	Vagens/Vaso	0,633*	0,648**
	Grãos/Vagem	0,307 ^{ns}	0,327 ^{ns}
LEd	Produção de Matéria Seca aos 35 Dias	0,882**	0,814**
	Produção de Matéria Seca aos 90 Dias	0,913**	0,897**
	Produção de Grãos	0,655**	0,574**
	Peso de 100 Grãos	0,427*	0,353 ^{ns}
	Vagens/Vaso	0,583**	0,509*
	Grãos/Vagem	0,349 ^{ns}	0,277 ^{ns}
LVd	Produção de Matéria Seca aos 35 Dias	0,703**	0,706**
	Produção de Matéria Seca aos 90 Dias	0,609**	0,617**
	Produção de Grãos	0,703**	0,683**
	Peso de 100 Grãos	0,435*	0,419*
	Vagens/Vaso	0,553**	0,552**
	Grãos/Vagem	0,408*	0,362 ^{ns}
AQd	Produção de Matéria Seca aos 35 Dias	0,878**	0,883**
	Produção de Matéria Seca aos 90 Dias	0,826**	0,906**
	Produção de Grãos	0,851**	0,856**
	Peso de 100 Grãos	0,489*	0,475*
	Vagens/Vaso	0,747**	0,771**
	Grãos/Vagem	0,466*	0,471*

(1) ** significativo ao nível de 1% de probabilidade; * significativo ao nível de 5% de probabilidade; ^{ns} não significativo.

Tabela 10. Equações de regressão ajustadas⁽¹⁾ para produções de matéria seca e de grãos com seus componentes (Y), como variáveis dependentes das doses (mg.kg^{-1}) de fósforo aplicadas (X), nos solos testados.

Solo	Parâmetro	Equação	R ²	Ponto de Máximo
LRd	Produção de Matéria Seca (35 dias)	$Y = 0,7603 + 0,0419X - 0,00006X^2$	0,996**	349,17
	Produção de Matéria Seca (90 dias)	$Y = 1,5657 + 0,0266X$	0,935**	-
	Produção de Grãos	$Y = 4,6066 + 0,1359X - 0,00020X^2$	0,841**	339,75
	Peso de 100 Grãos	$Y = 11,3993 + 0,1562X - 0,00030X^2$	0,481**	260,33
	Vagens/Vaso	$Y = 1,7969 + 0,0254X - 0,00005X^2$	0,745**	254,00
	Grãos/Vagem	$Y = 1,4478 + 0,0089X - 0,00002X^2$	0,390**	222,50
LEd	Produção de Matéria Seca (35 dias)	$Y = 0,6749 + 0,0403X - 0,00005X^2$	0,998**	403,00
	Produção de Matéria Seca (90 dias)	$Y = 2,2157 + 0,0277X$	0,952**	-
	Produção de Grãos	$Y = 7,3083 + 0,1207X - 0,00020X^2$	0,656**	301,75
	Peso de 100 Grãos	$Y = 11,6018 + 0,1718X - 0,00030X^2$	0,511**	286,33
	Vagens/Vaso	$Y = 2,1426 + 0,0216X - 0,00004X^2$	0,545**	270,00
	Grãos/Vagem	$Y = 1,4582 + 0,0089X - 0,00002X^2$	0,394**	222,50
LVd	Produção de Matéria Seca (35 dias)	$Y = 0,6592 + 0,0495X - 0,00008X^2$	0,995**	309,97
	Produção de Matéria Seca (90 dias)	$Y = 0,2300 + 0,0849X - 0,00015X^2$	0,966**	283,00
	Produção de Grãos	$Y = 6,8927 + 0,1345X - 0,00020X^2$	0,772**	336,21
	Peso de 100 Grãos	$Y = 10,6852 + 0,1899X - 0,00040X^2$	0,608**	237,37
	Vagens/Vaso	$Y = 2,1713 + 0,0221X - 0,00004X^2$	0,554**	276,25
	Grãos/Vagem	$Y = 1,4406 + 0,0090X - 0,00002X^2$	0,433**	225,00
A0d	Produção de Matéria Seca (35 dias)	$Y = 0,4778 + 0,0435X - 0,00006X^2$	0,996**	362,50
	Produção de Matéria Seca (90 dias)	$Y = 0,3479 + 0,0375X - 0,00005X^2$	0,997**	375,00
	Produção de Grãos	$Y = 2,1373 + 0,1329X - 0,00020X^2$	0,966**	332,25
	Peso de 100 Grãos	$Y = 11,3507 + 0,1484X - 0,00030X^2$	0,508**	247,33
	Vagens/Vaso	$Y = 1,4698 + 0,0263X - 0,00005X^2$	0,868**	263,00
	Grãos/Vagem	$Y = 1,3833 + 0,0092X - 0,00002X^2$	0,492**	230,00

(1) ** significativo ao nível de 1% de probabilidade; * significativo ao nível de 5% de probabilidade; ns não significativo.

considera-se a produção de matéria seca (35 e 90 dias) como o parâmetro da planta mais eficiente para avaliar a resposta do feijoeiro ao fósforo, nas condições em que foi desenvolvido este trabalho.

As doses de fósforo necessárias para atingir produções máximas, estimadas a partir da derivação das equações quadráticas, foram obtidas para a maioria dos parâmetros avaliados (Tabela 10). Apenas a produção de matéria seca aos 90 dias, no LRd e LEd, não apresentaram respostas quadráticas ao fósforo aplicado. As doses foram excessivamente altas, sendo os maiores valores obtidos para produção máxima de matéria seca aos 35 dias e produção de grãos. Na AQd, a maior dose foi determinada para a produção máxima de matéria seca aos 90 dias. Comparando os solos, observa-se que as doses de fósforo obtidas pelas derivadas das equações estão muito próximas, ao considerar os parâmetros equivalentes da planta.

OLIVEIRA et alii (1987) também encontraram doses elevadas (126 a 140 mg.kg⁻¹ e 112 a 130 mg.kg⁻¹ de P, nas épocas da seca e das águas, respectivamente) para o máximo rendimento físico de cinco cultivares de feijoeiro em ensaios de campo. Elas foram atribuídas à estabilização da produção em altos níveis de fósforo, com decréscimo apenas em doses muito altas de fertilizantes fosfatados. Tal explicação pode ser aplicada ao presente trabalho, a qual está associada ao fato do experimento ter sido

desenvolvido em casa de vegetação, o que, possivelmente contribuiu para a elevação das doses requeridas.

4.3. Absorção de Fósforo Pelo Feijoeiro

4.3.1. Concentração e Acumulação na Parte Aérea

As doses de fósforo aplicadas influenciaram significativamente a concentração e acumulação deste elemento na parte aérea do feijoeiro, exceto a concentração na parte aérea das plantas cultivadas na AQd aos 90 dias (Tabela 11). Apesar deste resultado, observa-se que os incrementos nas doses de fósforo não corresponderam a aumentos representativos sobre a concentração, ocorrendo em alguns casos, até relações inversas entre tais variáveis.

Considerando o período de 35 dias, os maiores incrementos na concentração foram dos diversos tratamentos em relação à testemunha e ao passar do nível de 200 para 400 mg.kg⁻¹. As demais doses resultaram em valores semelhantes de concentração de fósforo na parte aérea do feijoeiro. Comparando a testemunha com os outros tratamentos, no LEd, verifica-se comportamento similar ao LRd. No LVd, a concentração de fósforo mais alta foi manifestada pela testemunha, decrescendo de 25 até 200 mg.kg⁻¹, voltando a aumentar com aplicação de 400 mg.kg⁻¹ de P. Na AQd, os aumentos das

Tabela 11. Concentração e acúmulo de fósforo na parte aérea do feijoeiro para as diferentes doses aplicadas, em dois períodos, nos solos testados.

Solos	Doses de P	Concentração de Fósforo		Fósforo Acumulado	
		35	90	35	90
	-----mg. kg ⁻¹ -----	-----%-----		-----mg/2 plantas-----	
LRd	0	0,07	0,08	0,36	0,28
	25	0,17	0,08	3,48	2,06
	50	0,19	0,11	5,17	4,15
	100	0,19	0,14	8,21	7,42
	200	0,19	0,15	12,63	8,25
	400	0,24	0,17	18,72	21,20
<hr/>					
Teste F (1)					
Doses		24,53**	10,60**	71,09**	34,68**
Contraste (1)					
Linear		60,19**	43,90**	339,86**	167,58**
Quadrático		15,58**	7,22*	13,51**	1,31 ^{ns}
Coef. de Variação (%)		7,61	10,07	19,60	36,11
<hr/>					
LEd	0	0,08	0,10	0,56	0,77
	25	0,19	0,06	3,23	1,86
	50	0,21	0,09	4,93	4,09
	100	0,16	0,15	6,91	8,95
	200	0,16	0,17	10,35	12,10
	400	0,19	0,17	15,14	22,47
<hr/>					
Teste F (1)					
Doses		19,07**	16,62**	40,62**	39,00**
Contraste (1)					
Linear		10,36**	50,45**	189,58**	191,21**
Quadrático		7,87**	12,22**	11,27**	1,01 ^{ns}
Coef. de Variação (%)		7,11	9,74	23,58	31,43

Continuação da Tabela 11

Tabela 11. Concentração e acúmulo de fósforo na parte aérea do feijoeiro para as diferentes doses aplicadas, em dois períodos, nos solos testados.

Solos	Doses de P	Concentração de Fósforo		Fósforo Acumulado	
		35 (dias)	90	35 (dias)	90
	-----mg.kg ⁻¹ -----	-----%-----		-----mg/2 plantas-----	
LVd	0	0,35	0,11	2,45	0,49
	25	0,28	0,05	3,70	1,43
	50	0,24	0,10	6,48	3,77
	100	0,20	0,16	10,20	9,39
	200	0,20	0,19	14,10	22,89
	400	0,27	0,15	18,90	14,17
<hr/>					
Teste F (1)					
Doses		92,97**	42,83**	96,95**	58,01**
Contraste (1)					
Linear		91,87**	73,15**	434,17**	155,48**
Quadrático		9,93**	62,82**	41,78**	114,78**
Coef. de Variação (%)		3,88	6,73	14,56	25,87
<hr/>					
AQd	0	0,08	0,10	0,58	0,50
	25	0,16	0,09	2,24	1,14
	50	0,19	0,09	4,18	1,68
	100	0,24	0,10	10,49	3,52
	200	0,22	0,13	15,03	7,76
	400	0,34	0,12	28,05	8,72
<hr/>					
Teste F (1)					
Doses		82,34**	1,76 ^{ns}	81,94**	21,54**
Contraste (1)					
Linear		301,45**	5,72**	404,29**	231,34**
Quadrático		23,94**	0,71 ^{ns}	1,57 ^{ns}	23,94**
Coef. de Variação (%)		4,81	11,80	22,57	38,96

(1) ** significativo ao nível de 1% de probabilidade; * significativo ao nível de 5% de probabilidade; ^{ns} não significativo.

concentrações na parte aérea do feijoeiro acompanharam os incrementos nas doses aplicadas, exceto com 200 mg.kg⁻¹ de P, quando houve redução em relação à dose anterior (100 mg.kg⁻¹).

A falta de respostas positivas da concentração de fósforo às doses aplicadas pode ser explicada pelo efeito de diluição, ou seja; o grande acréscimo na produção de matéria seca nem sempre foi acompanhado por aumentos correspondentes nas quantidades de fósforo na parte aérea da planta.

As plantas cultivadas nos solos com os teores mais baixos de argila (LVd e AQd) apresentaram aos 35 dias maiores valores de concentrações médias de fósforo na parte aérea, os quais tornaram-se mais ou menos constantes para todos os solos aos 90 dias. As concentrações mais elevadas de fósforo, na parte aérea das plantas cultivadas nos solos mais arenosos aos 35 dias, resultaram da menor capacidade de retenção de fósforo por estes solos. Assim, grande parte do elemento aplicado permaneceu na solução, sendo absorvido pelas raízes do feijoeiro. Devido à menor capacidade tampão destes solos, a absorção contínua ao longo do tempo promoveu reduções mais drásticas do P-solução. Os solos mais argilosos restabeleceram quantidades mais elevadas de fósforo à solução, considerando um período mais longo. Além disso, os transportes mais acentuados de fósforo para os grãos, nas

plantas cultivadas nos solos LVd e AQd (Figura 1), contribuíram para as concentrações mais baixas na parte aérea das mesmas, principalmente no caso da AQd.

A Figura 1, que apresenta a distribuição de fósforo na parte aérea aos 90 dias e nos grãos do feijoeiro, mostra que a maior parte deste elemento foi translocada para os grãos nos solos testados. O comportamento da distribuição de fósforo na planta, variou segundo as doses aplicadas e os tipos de solos. Observa-se, redução no transporte de fósforo para os grãos, com o incremento nas doses aplicadas nos solos LRd e LEd, sendo que no primeiro caso (LRd), houve uma estabilização na faixa de 100 mg.kg^{-1} a 200 mg.kg^{-1} . O LVd e a AQd apresentaram reduções na translocação de fósforo de 100 mg.kg^{-1} até 200 mg.kg^{-1} , elevando-na a partir daí, de modo acentuado no LVd e mais suave na AQd. Considerando todas as doses, a Figura 1 sugere que os maiores transportes de fósforo para os grãos, ocorreram nos solos com menores teores de argila (LVd e AQd), principalmente no mais arenoso (AQd). Na média, aproximadamente 15% de fósforo foi retido na parte aérea e o restante translocado para os grãos, nos solos LRd e LEd. No LVd e na AQd, ocorreu transporte de 90% de fósforo para os grãos, permanecendo 10% na parte aérea.

Os resultados acima sugerem que, em condições desfavoráveis ao desenvolvimento da planta, a

Figura 1. Conteúdo de fósforo na parte aérea e nos grãos do feijoeiro.

translocação de fósforo para os grãos é mais acentuada, como no caso da A0d, cujas características físicas e químicas não permitiram um ciclo vegetativo semelhante às plantas cultivadas nos outros solos.

Mais uma vez constatou-se interação entre doses e solos (Tabela 12), sugerindo que além do efeito dos teores de fósforo aplicados, os atributos do solo influenciaram a concentração deste elemento na parte aérea do feijoeiro, nos dois períodos avaliados.

Tabela 12. Análise de variância conjunta para a concentração de fósforo na parte aérea do feijoeiro, nos períodos de 35 e 90 dias.

Tratamentos	Concentração de Fósforo	
	35 (dias)	90
Teste F (1)		
Solo (S)	22,71**	3,28*
Dose (D)	142,22**	42,78**
SxD	7,65**	3,57**
Contraste (1)		
Linear	297,90**	133,59**
Quadrático	51,58**	42,67**
Coef. de Variação (%)	5,92	9,66

(1) ** significativo ao nível de 1% de probabilidade; * significativo ao nível de 5% de probabilidade; ns não significativo.

Os coeficientes de correlação entre a concentração de fósforo na parte aérea (35 e 90 dias) e os parâmetros da planta avaliados (Tabela 13), em três dos solos estudados (LRd, LEd, LVd), segregaram estas variáveis

Tabela 13. Coeficiente de correlação linear simples⁽¹⁾ entre a concentração de fósforo na parte aérea do feijoeiro e as produções de matéria seca e de grãos com os respectivos componentes.

Solos	Parâmetros	Concentração de Fósforo	
		35 (dias)	90
LRd	Produção de Matéria Seca aos 35 dias	0,776**	0,811**
	Produção de Matéria Seca aos 90 dias	0,785**	0,812**
	Produção de Grãos	0,856**	0,732**
	Peso de 100 Grãos	0,862**	0,547**
	Vagens/Vaso	0,824**	0,691**
	Grãos/Vagem	0,816**	0,471**
LEd	Produção de Matéria Seca aos 35 dias	0,309 ^{ns}	0,779**
	Produção de Matéria Seca aos 90 dias	0,390 ^{ns}	0,687**
	Produção de Grãos	0,718**	0,487*
	Peso de 100 Grãos	0,780**	0,300 ^{ns}
	Vagens/Vaso	0,742**	0,435*
	Grãos/Vagem	0,800**	0,300 ^{ns}
LVd	Produção de Matéria Seca aos 35 dias	0,366 ^{ns}	0,771**
	Produção de Matéria Seca aos 90 dias	0,346 ^{ns}	0,737**
	Produção de Grãos	0,723**	0,467**
	Peso de 100 Grãos	0,791**	0,347 ^{ns}
	Vagens/Vaso	0,792**	0,348 ^{ns}
	Grãos/Vagem	0,869**	0,207 ^{ns}
AQd	Produção de Matéria Seca aos 35 dias	0,873**	0,443*
	Produção de Matéria Seca aos 90 dias	0,834**	0,434*
	Produção de Grãos	0,926**	0,352 ^{ns}
	Peso de 100 Grãos	0,765**	0,298 ^{ns}
	Vagens/Vaso	0,899**	0,288 ^{ns}
	Grãos/Vagem	0,778**	0,125 ^{ns}

(1) ** significativo ao nível de 1% de probabilidade; * significativo ao nível de 5% de probabilidade; ^{ns} não significativo.

em dois grupos distintos. Um deles constituído pela produção de grãos e seus componentes, relacionando-se melhor com a concentração de fósforo na parte aérea do feijoeiro aos 35 dias. O outro representado pela produção de matéria seca (35 e 90 dias), apresentando maiores coeficientes de correlação com a concentração de fósforo aos 90 dias. Na AQd, todos os parâmetros de planta, apresentaram as maiores correlações com a concentração de fósforo na parte aérea do feijoeiro, no período de 35 dias. Os valores determinados aos 90 dias representam apenas uma pequena parte da concentração que havia na planta aos 35 dias, pois expressam os teores de fósforo na parte aérea que não foram translocados para os grãos. Provavelmente esta seja uma explicação para as maiores correlações da produção e seus componentes com a concentração de fósforo na parte aérea aos 35 e não aos 90 dias.

Os resultados das médias de fósforo acumulado na parte aérea do feijoeiro (Tabela 11) mostraram respostas acentuadas da planta ao fósforo aplicado e influência significativa das doses sobre a variável avaliada, nas duas fases do ciclo. Foram observados aumentos representativos do fósforo acumulado na parte aérea com o incremento das doses, exceto para as plantas cultivadas no LVd, aos 90 dias, ao elevar a quantidade de fósforo aplicada, de 200 para 400 mg.kg⁻¹. Neste caso, o feijoeiro apresentou redução na absorção, refletindo o

comportamento manifestado pela produção de matéria seca.

A absorção de fósforo pelo feijoeiro aos 90 dias foi inferior na AQd, devido às menores quantidades de matéria seca apresentadas pelas plantas cultivadas neste solo, no referido período. A menor capacidade tampão da AQd, limitando o restabelecimento contínuo de fósforo na solução do solo, também comprometeu a absorção deste elemento até o final do ciclo da cultura. Observa-se tendência de reduções mais acentuadas na absorção de fósforo dos 35 para os 90 dias nos solos com teores mais baixos de argila, principalmente na AQd. Logo após a aplicação de fósforo, os solos mais arenosos apresentaram maiores quantidades deste elemento na solução, invertendo esta situação com a absorção contínua pela planta ao longo do tempo, devido à baixa capacidade tampão dos mesmos. Porém, os solos com teores mais elevados de argila (LRd e LEd) e maior capacidade tampão, por liberar fósforo à solução durante um período mais longo, favoreceram a absorção do nutriente pelas plantas, ao considerar todo o ciclo da cultura. O transporte mais acentuado de fósforo para os grãos na AQd também deve ter contribuído com as menores quantidades de fósforo acumulado na parte aérea feijoeiro cultivado neste solo, aos 90 dias.

As equações que relacionam as variáveis concentração e fósforo acumulado na parte aérea do feijoeiro com o fósforo aplicado aos solos estão expressas

na Tabela 14. A maioria apresentou natureza quadrática, sendo que, nos solos LRd e LEd o fósforo acumulado, aos 90 dias, respondeu linearmente e, na AQd, a concentração de fósforo aos 90 dias e o fósforo acumulado aos 35 dias, também manifestaram esta resposta. Os menores coeficientes de determinação foram obtidos para a concentração de fósforo aos 35 dias, em três dos solos estudados (LRd, LEd

Tabela 14. Equações de regressão ajustadas⁽¹⁾ para concentração fósforo acumulado na parte aérea do feijoeiro (Y) como variáveis dependentes das doses de fósforo aplicadas (mg.kg^{-1}), nos solos testados.

Solo	Parâmetro	Equação	R ²	Ponto de Máximo
LRd	Concentração de P (35 dias)	$Y = 0,0338 + 0,00010X - 0,0000002X^2$	0,617**	250,00
	Concentração de P (90 dias)	$Y = 0,0278 + 0,00008X - 0,0000001X^2$	0,964**	400,00
	P Acumulado (35 dias)	$Y = 1,1689 + 0,07720X - 0,0000800X^2$	0,994**	482,50
	P Acumulado (90 dias)	$Y = 0,7472 + 0,05100X$	0,966**	-
LEd	Concentração de P (35 dias)	$Y = 0,0368 + 0,00006X - 0,0000001X^2$	0,190*	300,00
	Concentração de P (90 dias)	$Y = 0,0257 + 0,00010X - 0,0000002X^2$	0,839**	250,00
	P Acumulado (35 dias)	$Y = 1,3610 + 0,06400X - 0,0000070X^2$	0,989**	457,14
	P Acumulado (90 dias)	$Y = 1,3921 + 0,05450X$	0,980**	-
LVd	Concentração de P (35 dias)	$Y = 0,0410 + 0,00006X - 0,00000008X^2$	0,219**	375,00
	Concentração de P (90 dias)	$Y = 0,0271 + 0,00010X - 0,00000030X^2$	0,635**	166,67
	P Acumulado (35 dias)	$Y = 1,8822 + 0,09040X - 0,00010000X^2$	0,982**	452,00
	P Acumulado (90 dias)	$Y = -2,2414 + 0,17960X - 0,00030000X^2$	0,932**	299,33
AQd	Concentração de P (35 dias)	$Y = 0,0350 + 0,00010X - 0,0000001X^2$	0,790**	500,00
	Concentração de P (90 dias)	$Y = 0,0306 + 0,00001X$	0,648**	-
	P Acumulado (35 dias)	$Y = 1,2986 + 0,06840X$	0,987**	-
	P Acumulado (90 dias)	$Y = -0,0499 + 0,04970X - 0,0000700X^2$	0,982**	355,00

(1) ** significativo ao nível de 1% de probabilidade; * significativo ao nível de 5% de probabilidade; ns não significativo.

e LVd). As melhores respostas às doses aplicadas foram obtidas em função do fósforo acumulado, provavelmente

porque neste caso não houve efeito de diluição, pois para determinação deste parâmetro, considera-se o peso da matéria seca.

4.3.2. Interação Entre Fósforo Solúvel e Concentração de Nutrientes na Parte Aérea

A Tabela 15 mostra coeficientes de correlação entre fósforo solúvel e teores de nutrientes na parte aérea do feijoeiro. Algumas destas relações merecem destaque pelos seus elevados valores e confirmação de resultados da literatura, como os efeitos negativos do fósforo sobre o zinco e cobre (BAHIA FILHO & BRAGA, 1972; FAGÉRIA, 1989; FAGÉRIA & ZIMMERMANN, 1979; MALAVOLTA, 1980).

As correlações negativas mais altas entre o P solúvel e o Zn ocorreram aos 35 dias, sendo os maiores valores obtidos nos solos LEd e AQd e os menores no LVd. As relações negativas elevadas entre os dois nutrientes na AQd podem ser explicadas pela maior disponibilidade de fósforo na solução deste solo aos 35 dias, contribuindo para a insolubilização do Zn pelo P. Nos outros solos, o efeito da diluição provavelmente favoreceu mais estas relações. Tais sugestões decorrem do fato de não existirem justificativas

Tabela 15. Coeficiente de correlação linear simples⁽¹⁾ entre concentrações dos nutrientes na parte aérea do feijoeiro e o fósforo solúvel.

Solos	Concentração de Nutrientes	Fósforo Solúvel	
		35 (dias)	90
LRd	Nitrogênio (35 dias)	-0,689**	-0,710**
	Fósforo (35 dias)	0,645**	0,623**
	Potássio (35 dias)	-0,057ns	-0,035ns
	Cálcio (35 dias)	-0,658**	-0,709**
	Magnésio (35 dias)	-0,623**	-0,687**
	Zinco (35 dias)	-0,735**	-0,756**
	Cobre (35 dias)	-0,837**	-0,836**
	Manganês (35 dias)	-0,224ns	-0,339ns
	Ferro (35 dias)	-0,206ns	-0,171ns
	Nitrogênio (90 dias)	0,168ns	0,178ns
	Fósforo (90 dias)	0,754**	0,778**
	Potássio (90 dias)	-0,670**	-0,697**
	Cálcio (90 dias)	0,284ns	0,250ns
	Magnésio (90 dias)	0,322ns	0,311ns
	Zinco (90 dias)	-0,614**	-0,612**
	Cobre (90 dias)	-0,455*	-0,484*
	Manganês (90 dias)	0,816**	0,821**
	Ferro (90 dias)	0,368ns	0,333ns
LEd	Nitrogênio (35 dias)	-0,757**	-0,683**
	Fósforo (35 dias)	0,245ns	0,186ns
	Potássio (35 dias)	-0,469*	-0,503*
	Cálcio (35 dias)	-0,589**	-0,629**
	Magnésio (35 dias)	-0,705**	-0,650**
	Zinco (35 dias)	-0,823*	-0,796**
	Cobre (35 dias)	-0,683**	-0,639**
	Manganês (35 dias)	-0,163ns	-0,144*
	Ferro (35 dias)	-0,420*	-0,401ns
	Nitrogênio (90 dias)	-0,147ns	-0,101ns
	Fósforo (90 dias)	0,676**	0,612**
	Potássio (90 dias)	-0,801**	-0,712**
	Cálcio (90 dias)	0,286ns	0,403ns
	Magnésio (90 dias)	-0,057ns	0,061ns
	Zinco (90 dias)	-0,475*	-0,439*
	Cobre (90 dias)	-0,207ns	-0,150ns
	Manganês (90 dias)	0,314ns	0,352ns
	Ferro (90 dias)	-0,139ns	-0,092ns

(continuação da Tabela 15)

Tabela 15. Coeficiente de correlação linear simples⁽¹⁾ entre concentrações dos nutrientes na parte aérea do feijoeiro e o fósforo solúvel.

Solos	Concentração de Nutrientes	Fósforo Solúvel	
		35 (dias)	90
LVd	Nitrogênio (35 dias)	-0,539**	-0,536**
	Fósforo (35 dias)	0,422*	0,376 ^{ns}
	Potássio (35 dias)	0,003 ^{ns}	-0,089 ^{ns}
	Cálcio (35 dias)	-0,570**	-0,600**
	Magnésio (35 dias)	-0,364 ^{ns}	-0,405*
	Zinco (35 dias)	-0,660**	-0,665**
	Cobre (35 dias)	-0,615**	-0,673**
	Manganês (35 dias)	0,160 ^{ns}	0,168 ^{ns}
	Ferro (35 dias)	-0,390 ^{ns}	-0,365 ^{ns}
	Nitrogênio (90 dias)	-0,082 ^{ns}	-0,060 ^{ns}
	Fósforo (90 dias)	0,436*	0,419*
	Potássio (90 dias)	-0,736**	-0,738**
	Cálcio (90 dias)	0,141 ^{ns}	0,150 ^{ns}
	Magnésio (90 dias)	0,186 ^{ns}	0,195 ^{ns}
	Zinco (90 dias)	-0,354 ^{ns}	-0,365 ^{ns}
	Cobre (90 dias)	-0,442*	0,464*
	Manganês (90 dias)	0,677**	0,661**
	Ferro (90 dias)	0,095 ^{ns}	0,126 ^{ns}
AQd	Nitrogênio (35 dias)	-0,770**	-0,813**
	Fósforo (35 dias)	0,836**	0,811**
	Potássio (35 dias)	0,448*	0,517**
	Cálcio (35 dias)	-0,299 ^{ns}	-0,123 ^{ns}
	Magnésio (35 dias)	-0,717**	-0,744**
	Zinco (35 dias)	-0,821**	-0,876**
	Cobre (35 dias)	-0,025 ^{ns}	-0,046 ^{ns}
	Manganês (35 dias)	-0,499*	-0,606**
	Ferro (35 dias)	-0,545**	-0,564**
	Nitrogênio (90 dias)	-0,343 ^{ns}	-0,368 ^{ns}
	Fósforo (90 dias)	0,381 ^{ns}	0,363 ^{ns}
	Potássio (90 dias)	-0,777**	-0,783**
	Cálcio (90 dias)	-0,629**	-0,653**
	Magnésio (90 dias)	-0,025 ^{ns}	-0,028 ^{ns}
	Zinco (90 dias)	-0,665**	-0,696**
	Cobre (90 dias)	-0,665**	0,696**
	Manganês (90 dias)	-0,489*	-0,510*
	Ferro (90 dias)	-0,295 ^{ns}	-0,295 ^{ns}

(1) ** significativo ao nível de 1% de probabilidade; * significativo ao nível de 5% de probabilidade; ^{ns} não significativo.

concretas e objetivas para a interação $P \times Zn$. Várias explicações são dadas, como: efeito de diluição; insolubilização do zinco na superfície das raízes, diminuindo sua absorção; redução do transporte das raízes para parte aérea; distúrbios metabólicos nas células da planta, provocados pelo desequilíbrio entre o fósforo e zinco; inibição não competitiva da absorção do zinco pelo fósforo (LOPEZ-G, 1973; MALAVOLTA, 1980; OLSEN, 1972).

O cobre também destacou-se pelas correlações negativas verificadas aos 35 dias, exceto na AQd, que apresentou este comportamento apenas aos 90 dias. A relação negativa entre os dois nutrientes é descrita em literatura (FAGÉRIA, 1989; MALAVOLTA 1980).

Os teores de nitrogênio aos 35 dias relacionaram-se bem com o fósforo extraído nos solos estudados, apresentando correlações negativas.

O efeito de diluição, provocado pelo acentuado desenvolvimento vegetativo das plantas, em resposta à aplicação de fósforo, pode ser o principal fator responsável pelas correlações negativas, tanto em relação ao cobre quanto ao nitrogênio.

As correlações entre o fósforo solúvel e a concentração de fósforo na parte aérea do feijoeiro, seguiram o mesmo comportamento irregular, verificado para as respostas da concentração deste elemento ao fósforo aplicado. Observaram-se correlações positivas entre o

fósforo extraído e sua concentração na parte aérea das plantas cultivadas no LRd aos 35 e 90 dias, no LEd, aos 90 dias e na AQd, aos 35 dias. Os elevados valores determinados para AQd aos 35 dias devem-se aos maiores teores de P nas plantas neste período, em função da menor capacidade de retenção de fósforo deste solo.

4.3.3. Eficiência de Recuperação de Fósforo

A Tabela 16 apresenta os valores da eficiência do feijoeiro em recuperar o fósforo aplicado, calculada a partir das equações que relacionam o Pabsorvido com o aplicado, expressos em percentagem (BALIGAR et alii, 1990). A maior eficiência de absorção nos solos LRd e LEd foi obtida com a aplicação de 25 mg.kg^{-1} , sendo que na AQd e no LVd, a dose de 50 mg.kg^{-1} foi muito semelhante à anterior. As reduções mais drásticas na eficiência de absorção foram observadas com a aplicação das maiores doses (200 e 400 mg.kg^{-1} de P), comprovando a baixa eficiência fisiológica de absorção de fósforo, para as elevadas quantidades aplicadas. GOMES & BRAGA (1980) encontraram resultados semelhantes para cultivares de feijão.

As plantas apresentaram as menores taxas de recuperação de fósforo no solo mais arenoso (AQd), ao considerar as doses nas quais a eficiência de absorção foi maior (25 e 50 mg.kg^{-1}). Nas doses mais elevadas (200 e 400

Tabela 16. Eficiência de absorção de fósforo, pelo feijoeiro, nos diferentes solos testados.

Solos	Doses de Fósforo	Fósforo ⁽¹⁾ Absorvido	Eficiência ⁽²⁾ de Absorção
	-----mg. kg ⁻¹ -----		-----%-----
LRd	0	0,12	-
	25	5,63	22,04
	50	7,74	15,24
	100	12,05	11,93
	200	14,67	2,27
	400	18,66	4,63
LEd	0	0,22	-
	25	6,30	24,32
	50	10,43	20,42
	100	14,37	14,15
	200	14,31	7,04
	400	19,55	4,83
LVd	0	0,49	-
	25	6,49	24,00
	50	12,35	23,72
	100	15,66	15,17
	200	19,83	4,67
	400	21,97	5,37
AQd	0	0,18	-
	25	3,57	13,56
	50	7,28	14,20
	100	11,40	11,22
	200	16,08	7,95
	400	26,05	6,47

(1) refere-se às quantidades absorvidas, determinadas na parte aérea e nos grãos, divididas pela quantidade de solo dos respectivos vasos.

(2) [(Absorção de P com a Dose Aplicada - Absorção sem Aplicação de P)] x 100 / Dose Aplicada

mg. kg⁻¹), esta eficiência de absorção foi semelhante, e em alguns casos até superior aos demais solos, concordando com resultados obtidos em outros trabalhos (FONSECA, 1987; MUNIZ, 1983). As diferenças de comportamento quanto à eficiência de absorção apresentadas pela planta em relação

aos solos estudados podem ser resultantes de características químicas dos mesmos. Na AQd é possível que as limitações de fertilidade, representadas principalmente pelos baixos teores de cobre e manganês, tenham contribuído para os valores reduzidos de eficiência de recuperação de fósforo em relação aos outros solos. A adubação básica aplicada à AQd, não foi suficiente para elevar alguns componentes de fertilidade a níveis adequados, como os micronutrientes acima citados, comprometendo o desenvolvimento vegetativo das plantas até a maturação, e consequentemente, a eficiência de absorção de fósforo. Com a aplicação de 200 e 400 mg.kg⁻¹ de P, a AQd, em função de sua menor capacidade de retenção de fósforo, apresentou teores mais elevados de P-solução, suficientes para compensar as limitações resultantes da fertilidade.

4.3.4. Níveis Críticos de Fósforo na Parte Aérea do Feijoeiro

Estabeleceram-se as concentrações críticas de fósforo na parte aérea do feijoeiro, para proporcionar 90% da produção de matéria seca aos 35 dias (Figura 2), em dois dos solos testados. Apesar deste parâmetro geralmente ser determinado em relação às folhas com idades fisiológicas e localização na planta bem definidos (BATES, 1971), tem-se considerado para uma mesma idade, que existe

Figura 2. Concentração crítica de fósforo na parte aérea do feijoeiro aos 35 dias.

correlação significativa entre a concentração crítica de fósforo na parte aérea, como um todo e a concentração na folha, mesmo admitindo que os aumentos de concentração nas diferentes partes possam ser, proporcionalmente, diferentes (MUNIZ, 1983).

Considerou-se o período de 35 dias como representativo do nível crítico na parte aérea do feijoeiro, já que o efeito da diluição aumenta com o crescimento vegetativo, provocando redução do teor crítico com a idade da planta. Este efeito foi observado por FAGÉRIA (1987) em cultivares de arroz.

Apenas foi possível determinar a concentração crítica de fósforo na parte aérea, de forma gráfica, para os solos LRd e AQd, representantes das texturas argilosas e arenosas, respectivamente. Provavelmente este comportamento possa ser explicado pela variação irregular das concentrações na parte aérea, em resposta às doses de fósforo aplicadas. Na maioria dos tratamentos não houve relação positiva entre as duas variáveis, principalmente aos 35 dias.

Os valores determinados graficamente foram de 0,20 para o solo argiloso (LRd) e 0,28 para o arenoso (AQd), concordando com a relação inversa entre níveis críticos na parte aérea e teor de argila encontrada pela maioria dos trabalhos desenvolvidos com tal objetivo (FABRES, 1986; FONSECA, 1987; MUNIZ et alii, 1985; NEVES et

alii, 1986). A menor capacidade tampão da A0d foi o principal fator responsável pelas concentrações críticas de fósforo mais elevadas na parte aérea do feijoeiro cultivado neste solo aos 35 dias.

Em termos quantitativos, os teores críticos também estão dentro da faixa considerada adequada para a cultura do feijoeiro. MALAVOLTA (1989), considerando os teores em folhas coletadas no florescimento, cita 0,2 a 0,3% como adequados. Wilcox & Fagéria, citados por OLIVEIRA & THUNG (1988) encontraram valores entre 0,25 e 0,50%. FEITOSA et alii (1980) determinaram 0,33% como nível crítico para amostras da terceira folha de feijão irrigado, em experimento de campo.

Devido ao grande número de fatores que influenciam a determinação do nível crítico na planta deve-se ter cuidado ao utilizá-lo como forma de diagnosticar deficiências nutricionais. No caso do fósforo, é necessário considerar além dos fatores relacionados à planta e ao ambiente, aqueles relacionados à capacidade tampão do solo.

4.4. Níveis Críticos de Fósforo no Solo

A relação entre o fósforo extraído e a produção relativa de matéria seca aos 35 dias é mostrada na Figura 3. O nível crítico de fósforo no solo ou teor de fósforo capaz de proporcionar 90% da produção de matéria

Figura 3. Teores de fósforo no solo, para proporcionar 90% da produção relativa de matéria seca aos 35 dias.

Figura 3. Teores de fósforo no solo, para proporcionar 90% da produção relativa de matéria seca aos 35 dias.

seca aos 35 dias, foi determinado a partir do modelo de regressão $ax + bx^{1/2} + c$.

Os níveis críticos de P no solo (Figura 3) estão acima da maioria dos valores encontrados em literatura, para o feijoeiro e outras culturas (CARVALHO et alii, 1989; FAGÉRIA, 1989; GOEPFERT, 1972; KORNELIUS et alii, 1976; MIRANDA & LOBATO, 1978; MUNIZ, 1983; NOVAIS, 1977). A relação inversa com os teores de argila, entretanto, acompanhou o resultado da maioria de trabalhos referentes a esse assunto (BAHIA FILHO, 1982; BAHIA FILHO et alii, 1983; FREIRE et alii, 1979; GONÇALVES et alii, 1986; MUNIZ, 1983; NEVES, 1983; NOVAIS, 1977; VIDOR & FREIRE, 1971). Comparando um solo que apresenta 61% de argila (LRd) e outro com 14% de argila (AQd), observamos que o nível crítico foi de $68,0 \text{ mg.kg}^{-1}$ e de $232,0 \text{ mg.kg}^{-1}$, respectivamente.

Os solos arenosos apresentam maior disponibilidade de fósforo após a adubação, pois seus sítios de adsorção são saturados mais rapidamente e com baixa energia. Ao contrário, nos solos argilosos, apenas uma pequena parte destes sítios são ocupados pelos íons fosfatos e com elevada energia de adsorção. Assim, no plantio, os solos LRd e LEd apresentaram menores quantidades de P-lábil com elevada energia de adsorção, devido à alta afinidade dos íons fosfatos pelos sítios pouco saturados. Entretanto, os solos mais arenosos,

principalmente a AQd, mostraram elevados teores de fósforo lábil, com menor energia de adsorção, conseqüentemente mais prontamente disponível às plantas. Este comportamento ocorre quando são aplicadas doses iguais de fósforo aos solos, não considerando a capacidade máxima de adsorção (CMAF) de cada um, como no presente trabalho. Ao determinar a quantidade de fósforo a ser aplicada em função da CMAF, obtêm-se uma relação direta entre níveis críticos e teores de argila (FONSECA, 1987; LEITE, 1984).

Observa-se que as doses de fósforo aplicadas aos solos testados foram elevadas e a eficiência de recuperação deste elemento pelo feijoeiro foi baixa, principalmente para as maiores doses (Tabela 16). FABRES (1986) sugeriu a baixa eficiência de absorção e/ou de utilização do fósforo, como justificativa para os elevados níveis críticos no solo, encontrados em ensaios com cultura de alface. Este argumento associado às elevadas doses de fósforo aplicadas aos solos poderia justificar os altos valores de níveis críticos obtidos neste trabalho.

Os elevados valores de níveis críticos determinados neste trabalho, assim como os obtidos por outros autores (FABRES, 1986; FONSECA 1987), sugerem que ensaios desenvolvidos em casa de vegetação, superestimam a necessidade nutricional das culturas. Portanto devem ser utilizados como um estudo preliminar do comportamento das plantas em relação a diferentes solos, mas não como um

resultado prático para recomendação de adubação.

4.5. Classes de Teores de Fósforo no Solo

As relações entre o fósforo obtido pelo extrator e a produção relativa de grãos são mostradas na Figura 4, para os quatro solos testados. Baseando-se no modelo $ax + bx^{1/2} + c$ foram determinadas as seguintes classes de teores de fósforo nos solos, com os respectivos intervalos de produção relativa de grãos: "baixa" - 0 a 70% de produção relativa; "média" - 70 a 90% e "alta" > 90%.

A classificação do teor de fósforo no solo e sua interpretação (Tabela 17) mostram diferenças entre solos, quanto a necessidade deste elemento para os diversos níveis de produção relativa. Os solos mais argilosos (LRd e LEd) exigiram menores quantidades de fósforo para todas as faixas de produção relativa.

Os solos mais argilosos possuem elevada capacidade de retenção de fósforo, mantendo-o na forma lábil com elevada energia de adsorção ou transformando-o em P-não lábil, que posteriormente poderá retornar a P-lábil e passar para a solução do solo. Os teores de P-solução são muito baixos nestes solos, mas a reserva (P-não lábil + P-lábil) normalmente é alta, podendo em função da elevada capacidade tampão que possuem, manter concentrações

Figura 4. Relação entre teores de fósforo no solo e produção relativa de grãos.

Figura 4. Relação entre teores de fósforo no solo e produção relativa de grãos.

adequadas do elemento na solução por um período mais longo. Os solos arenosos, ao contrário, apresentam inicialmente maiores quantidades de fósforo na solução, mas devido à baixa capacidade tampão exaurem o P-lábil com facilidade e rapidez, exigindo reposição mais frequente deste nutriente.

Tabela 17. Classificação de P nos diferentes solos de cerrado, em relação à produção relativa de grãos de feijão, cultivado em casa de vegetação.

Solo	Produção Relativa	Teor de Fósforo	Interpretação
	----%----	--mg.kg ⁻¹ --	
LRd	0 - 70	0 - 18	Baixo
	70 - 90	18 - 52	Médio
	> 90	> 52	Alto
LEd	0 - 70	0 - 21	Baixo
	70 - 90	21 - 50	Médio
	> 90	> 50	Alto
LVd	0 - 70	0 - 67	Baixo
	70 - 90	67 - 265	Médio
	> 90	> 265	Alto
AQd	0 - 70	0 - 102	Baixo
	70 - 90	102 - 204	Médio
	> 90	> 204	Alto

A relação entre os teores de fósforo e de argila foi coerente com a maioria dos resultados de trabalhos desenvolvidos nesta linha, o mesmo não podendo ser afirmado sobre os elevados valores obtidos para todas as classes de teores de fósforo.

Os valores obtidos servem de base à elaboração de tabelas de adubação para experimentos de casa de vegetação, nas condições em que desenvolveu-se este

trabalho. No campo, eles permitem apenas a comparação de diferentes solos quanto à necessidade de adubação.

5. CONCLUSÕES

Considerando os resultados obtidos neste trabalho, desenvolvido sob condições de casa de vegetação, conclui-se que:

Os solos mais arenosos (LVd, AQd), apresentaram teores bem mais elevados de fósforo solúvel em relação aos mais argilosos (LRd, LEd), obedecendo a seguinte sequência de disponibilidade do elemento em estudo: AQd > LVd > LEd > LRd.

Os parâmetros de planta avaliados (produção de matéria seca aos 35 e 90 dias, produção de grãos, peso de 100 grãos, número de vagens por duas plantas, número de grãos por vagem) foram influenciados pelos incrementos nas doses de fósforo aplicadas. Os maiores valores dos coeficientes de correlação linear com o fósforo solúvel e de determinação (R^2) em relação ao fósforo aplicado, foram apresentados pela produção de matéria seca (aos 35 dias e 90 dias).

A concentração de fósforo na parte aérea do feijoeiro apresentou comportamento bastante irregular em

relação à aplicação do elemento, nem sempre respondendo positivamente ao incremento das doses, nos solos testados. Os menores valores deste parâmetro foram observados aos 90 dias. O fósforo acumulado na parte aérea do feijoeiro, demonstrou respostas acentuadas da produção de matéria seca pela planta à absorção do elemento em estudo. As melhores relações (correlação e regressão) dos parâmetros de planta, foram obtidas com o fósforo acumulado e não com a concentração deste nutriente na parte aérea.

O fósforo solúvel influenciou negativamente os seguintes elementos: nitrogênio, zinco e cobre.

A menor eficiência de absorção de fósforo pelo feijoeiro ocorreu no solo mais arenosos (AQd), principalmente com aplicação das doses de 25 e 50 mg.kg^{-1} de P.

Na planta, determinou-se o nível crítico graficamente apenas em dois solos (LRd e AQd), encontrando valor mais elevado (0,28%) no solo arenoso em relação ao argiloso (0,20%).

Os níveis críticos determinados para os solos em estudo foram elevados e inversamente relacionados aos teores de argila. Os valores obtidos variaram de 68,0 mg.kg^{-1} no solo mais argiloso (LRd) a 233 mg.kg^{-1} no mais arenoso (AQd).

As classes de teores de fósforo obtidas no presente trabalho, para as diferentes faixas de produção

relativa de grãos, apresentaram valores elevados e os solos mais argilosos exigiram menores quantidades deste elemento em todas as faixas. Considerando o intervalo de 70 a 90% de produção relativa, as classes de teores de fósforo foram para os solos LRd, LEd, LVd e A0d, respectivamente as seguintes: 18 - 52; 21 - 50; 67 - 265; 102 - 204 mg.kg⁻¹.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADRIANO, D.C.; PAULSEN, G.M. e MURPHY, L.S. Phosphorus iron and phosphorus-zinc relationships in corn (*Zea mays* L.) seedlings as affected by mineral nutrition. Agron. Journal, Madison, 63: 31-39, 1971.
- ALMEIDA NETO, J. X. de e BRASIL SOBRINHO, M.O.C. do. Fixação de fósforo em três solos sob cerrado de Goiás. R. bras. Ci. Solo, 1: 12-15, 1977.
- AYODELE, O. e AGBOOLA, A.A. Evaluating of phosphorus fixation capacity of tropical savannah soils of western Nigeria. Soil Science Society of America Journal, Atlanta, 45: 462-464, 1981.
- BAHIA FILHO, A.F.C. e BRAGA, J.M. Fósforo em latossolos do Estado de Minas Gerais. III. índices de disponibilidade de fósforo e crescimento vegetal. Experientiae, Viçosa, 20: 217-34, 1975b.

BAHIA FILHO, A.F.C. e BRAGA, J.M. Fósforo em latossolos do Estado de Minas Gerais. I. Intensidade e capacidade tampão de fósforo. Experientiae, Viçosa, 19: 18-32, 1975a.

BAHIA FILHO, A.F.C. índices de disponibilidade de fósforo em latossolos do Planalto Central com diferentes características texturais e mineralógicas. Viçosa, 1982, 178p. (Doutorado - Universidade Federal de Viçosa).

BAHIA FILHO, A.F.C.; BRAGA, J.M.; RESENDE, M. e RIBEIRO, A.C.. Relação entre adsorção de fósforo e componentes mineralógicos da fração argila de Latossolos do Planalto Central. R. bras. Ci. Solo, Campinas, 7: 221-6, 1983.

BAHIA, F.G.F.T. e BRAGA, J.M. Influência da adubação fosfatada e calagem sobre a absorção de zinco, em dois solos de Minas Gerais. Rev. Ceres, Viçosa, 21(115): 167-192, 1974.

BALIGAR, V.C., DUNCAN, R.R. e FAGERIA, N.K. Soil-plant interaction on nutrient use efficiency in plants: an overview. In: BALIGAR, V.C. e DUNCAN, R.R., ed. Crops as enhancers of nutrient use. San Diego, Academic Press, Inc., Marcel Dekker, Inc., 1990. Cap. 9, p.351-373.

BAR-TAL, A.; BAR-YOSEF, B. e KAFKAFI, U. Pepper seedling response to steady and transient N and P supply. Agronomy Journal, Madison, 82(3): 600-606, 1990.

BARBER, S.A. A diffusion and mass-flow concept of soil nutrient availability. Soil Science, Baltimore, 93: 39-49, 1962.

BARBOSA FILHO, M.P. Transformações de fósforo em solos ácidos e sua disponibilidade para a cultura de arroz de sequeiro (*Oryza sativa* L.). Piracicaba, 1986, 104p. (Doutorado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP).

BARBOSA FILHO, M.P.; KINJO, T. e MURADKA, T. Relações entre fósforo "extraível", frações inorgânicas de fósforo e crescimento de arroz em função de fontes de fósforo, calagem e tempo de incubação. R. bras. Ci. Solo, Campinas, 11: 147-155, 1987.

BATES, T.E. Factors affecting critical concentration in plants and their evaluation: a review. Soil Sci., Baltimore, 112: 116-130, 1971.

BRAGA, J.M. e DEFELIPO, B.V. Relações entre formas de fósforo inorgânico, fósforo disponível e material vegetal em solos sob vegetação de cerrado. II. Trabalhos de laboratório. Rev. Ceres, Viçosa, 19 (102): 124-136, 1972.

BRAGA, J.M. Fósforo. V Ciclo de Atualização em Ciências Agrárias. DASCA. Universidade Federal de Curitiba, PR. 1978.

CABALA, R.P. e SANTANA, M.B.M. Disponibilidade e diagnose de fósforo pela análise química do solo com referência ao Brasil. Rev. bras. Ci. Solo, Campinas, 7: 109-118. 1983.

CARVALHO, M.M.; SARAIVA, D.F. e VERNEQUE, R.S. Níveis críticos externos e internos de fósforo em duas leguminosas tropicais em um solo ácido. R. bras. Ci. Solo, Campinas, 13: 311-314, 1989.

DOW, A.I. e ROBERTS, A.I. Proposal-critical nutrient ranges for crop diagnosis. Agron. J., 74: 401-3, 1982.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos, 1979. n.p.

FABRES, A.S. Disponibilidade de fósforo em solos e concentrações críticas de diferentes frações de fósforo em plantas de alface cultivadas em amostras de diferentes solos. Viçosa, 1986. 39p. (Mestrado - Universidade Federal de Viçosa).

FAGÉRIA, N.K. Adubação e nutrição mineral da cultura de arroz. Goiânia, EMBRAPA/CNPAP, Ed. Campus, 1984. 341p.

FAGÉRIA, N.K. Calibração de análise de fósforo para arroz em casa de vegetação. Pesq. agropec. bras., Brasília, 25(4): 579-586, 1990.

FAGÉRIA, N.K. Critical P, K, Ca and Mg contents in the tops of rice and peanut plants. Pl. Soil, Hague, 45: 421-431, 1976.

FAGÉRIA, N.K. e BALIGAR, V.C. Response of legumes and cereals to phosphorus in solution culture. Journal of Plant Nutrition, 12(9): 1005-1019, 1989.

FAGÉRIA, N.K. e BARBOSA FILHO, M.P. Phosphorus fixation in oxisol of Central Brazil. Fertilizers and Agriculture, Paris, 94: 33-37, 1987.

FAGÉRIA, N.K. e ZIMMERMANN, F.J.P. Interação entre fósforo, zinco e calcário em arroz-de-sequeiro. R. bras. Ci. Solo, Campinas, 3: 88-92, 1979.

FAGÉRIA, N.K. Effects of phosphorus on growth, yield and nutrient accumulation in the common bean. Trop. Agric., Trinidad, 66: 249-255, 1989b.

FAGÉRIA, N.K. Rice cultivars response to phosphorus in nutrient solution. Pesq. agropec. bras., Brasília, 24(6): 699-702, 1989a.

FAGÉRIA, N.K. Variação em diferentes estádios de crescimento do nível crítico de fósforo em plantas de arroz. R. bras. Ci. Solo, Campinas, 11: 77-80, 1987.

FAGÉRIA, N.K.; BALIGAR, V.C. e JONES, C.A. Common bean and cowpea. In: Growth and mineral nutrition of field crops. New York, Ed. Marcel Dekker, 1991. Cap. 10, p.280-318.

FAO. FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. Production Yearbook. Roma, 1984. v.38 (FAO Statistics Series, 61).

FASSBENDER, H.W. La fertilization del frijol (*Phaseolus* sp). Turrialba. 17(1):56-52, 1967.

FEITOSA, C.T. e RAIJ, Van B. Influência da natureza de fosfatos aplicados a dois solos no fósforo solúvel em extratores químicos e disponível para trigo e milho. In: ANAIS DO XV CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, Campinas, p. 215-220. 1976.

FEITOSA, C.T.; RONZELLI JÚNIOR, P.; ALMEIDA, L.D'A. de; VEIGA, A.A.; HIROCE, R. e JORGE, J.P.N. Adubação NP para o feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*, L.) na presença e na ausência de calcário. R. bras. Ci. Solo. Campinas, 4(3): 156-9, 1980.

FERREIRA, M.E., MELLO, F.A.F. e DO BRASIL SOBRINHO, M.O.C. Comparação entre três técnicas de extração de P solúvel do solo. Científica, 5(3): 244-249, 1978.

FONSECA, D.M. Níveis críticos de fósforo em amostras de

solos para o estabelecimento de *Andropogon gayanus*, *Brachiaria decumbens* e *Hyparrhenia rufa*. Viçosa, 1987. 146p. (Mestrado - Universidade Federal de Viçosa).

FOX, R.L. e KAMPRATH, E.J. Phosphate sorption isotherms for evaluating the phosphate requirements of soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc., Madison, 34: 902-907, 1970.

FREIRE, F.M.; NOVAIS, R.F.; BRAGA, J.M.; FRANÇA, G.C.; SANTOS, H.L. e SANTOS, P.R.R.S. Adubação fosfatada para a cultura de soja (*Glycine max* (L.) Merrill) baseada no fósforo disponível e no fator "capacidade". Rev. bras. Ci. Solo, Campinas, 3: 105-111, 1979.

FRITZ, G.F. Mineral nutrition. In: NOGLE, G. e FRITZ, G.J. *Introductory Plant Physiology*. New Jersey, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, 1976, p.223-271.

GOEDERT, W.J. e LOBATO, E. Eficiência agronômica de fosfatos em solos de cerrado. Pesq. agropec. bras., Brasília, 15 (3): 311-318, 1980.

GOEDERT, W.J. Região dos cerrados: Potencial agrícola e política para seu desenvolvimento. Pesq. agropec. bras., Brasília, 24(1): 1-17, 1989.

GOEDERT, W.J.; SOUSA, D.M.G. de e LOBATO, E. Fósforo. In: GOEDERT, W.J. Solos dos cerrados: Tecnologias e estratégias de manejo. Brasília, EMBRAPA/CPAC, 1986. p.129-166.

GOEPFERT, C.F. Experimento sobre o efeito residual da adubação fosfatada em feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*, L.). Agronomia Sulriograndense, Porto Alegre, 8(1): 41-7, 1972.

GOMES, J.C. e BRAGA, J.M. Relação entre a capacidade tampão de fósforo de três Latossolos de Minas Gerais e absorção diferencial de fósforo em três cultivares de feijão (*Phaseolus vulgaris*, L.). Rev. Ceres, Viçosa, 27: 134-144, 1980.

GONÇALVES, J.L.M. de; BARROS, N.F. de; NEVES, J.C.L. e NOVAIS, R.F. de. Níveis críticos de fósforo no solo e na parte aérea de eucalipto na presença e ausência da calagem. Rev. Árvore, Viçosa, 10(1): 91-104, 1986.

GONÇALVES, J.L.M.; FIRME, D.J.; NOVAIS, R.F. e RIBEIRO, A.C. Cinética de adsorção de fósforo em solos de cerrado. R. bras. Ci. Solo, Campinas, 9: 107-111, 1985.

HISLOP, J e COOKE, I.J. Anion exchange resin as a means of assessing soil phosphate status: a laboratory technique. Soil Science, Baltimore, 92(66): 398-402, 1966.

HOLFORD, I.C.R. e MATTINGLY, G.E.G. Effects of phosphate buffering on the extraction of labile phosphate by plants and by soil tests. Aust. J. Soil Res., Melbourne, 17: 511-14, 1979.

KORNELIUS, E.; SOBRAL, L.F.; GOMES, J. de C. e RODRIGUES, E.M. Efeitos de doses de nitrogênio e fósforo na produção de feijão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 15., Campinas. Anais. Campinas, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1976. p.203-5.

LEAL, J.R. e VELOSO, A.C.X. Adsorção de fosfato por latossolos sob vegetação de cerrado. Pesquisa agropec. Bras., Brasília, 8: 81-88, 1973.

LEITE, R. de A. Uso de matrizes experimentais e de modelos estatísticos no estudo de equilíbrio fósforo-enxofre na cultura da soja em amostras de dois latossolos de Minas Gerais. Viçosa, 1984. 87p. (Mestrado - Universidade Federal de Viçosa).

LOPES, A.S. e COX, F.R. Relação de características físicas, químicas e mineralógicas com fixação de fósforo em solos sob cerrados. Rev. bras. Ci. Solo, Campinas, 3: 82-88, 1979.

LOPES, A.S. e COX, F.R.A. Survey of the fertility status of surface soils under cerrado vegetations in Brazil. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 41: 742-747, 1977.

LOPEZ-G, O.E. Contribuição ao estudo das relações entre o zinco e o fósforo na nutrição das plantas. Piracicaba, 1972. (Doutorado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP).

MAHTAB, S.K.; GODFREY, L.C.; SWOBODA, A.R. e THOMAS, G.W. Phosphorus diffusion in soils: the effect of applied P, Clay content, and water content. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., Madison, 35: 393-397, 1971.

- MALAVOLTA, E. Elementos de nutrição mineral de plantas. Piracicaba, Editora Agronômica Ceres, 1980.
- MALAVOLTA, E. Nutrição e adubação. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE FEIJÃO, 1., Viçosa, 1971. Anais. São Paulo, Ministério da Agricultura, 1972. p.209-42.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C. e OLIVEIRA, S.A.de. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. Piracicaba, Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1989. 201p.
- MESQUITA FILHO, M.V. de; MIRANDA, L.N.de e KLUTHCOUSKI, J. Avaliação de cultivares de feijão para sua tolerância à toxicidade de alumínio com relação à disponibilidade de fósforo em solo de cerrado. Rev. bras. Ci. Solo, Campinas, 6: 43-46, 1982.
- MIRANDA, L.N. de e LOBATO, E. Tolerância de variedades de feijão e de trigo ao alumínio e à baixa disponibilidade de fósforo no solo. R. bras. Ci. Solo, Campinas, 2: 44-50, 1978.
- MIRANDA, L.N. e VOLKWEIS, S.J. Relações entre a resposta da soja a adubação fosfatada e alguns parâmetros do solo. Rev. bras. Ci. Solo, Campinas, 5:58-63, 1981.

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

MUNIZ, A.S.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F. e NEVES, C.L. Nível crítico de fósforo na parte aérea da soja como variável do fator capacidade de fósforo do solo. R. bras. Ci. Solo, Campinas, 9: 237-243, 1985.

NEPTUNE, A.M.L. e PEREZ, A.J.L. Disponibilidade de fósforo e correlações entre formas e quantidades absorvidas pelo feijoeiro (Phaseolus vulgaris, L.) em solos do Estado de São Paulo. Anais da E.S.A. "Luiz de Queiroz", Piracicaba, XLIV: 769-800, 1987.

NEVES, J. C. L.; BARROS, N.F. e MUNIZ, A.S. Variação da concentração crítica de fósforo em mudas de eucalipto com o poder tampão deste elemento no solo. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERILIDADE DO SOLO, 17. Londrina. Resumos. Londrina, SBPC, 1986. p.11.

NEVES, R.F. Aspectos nutricionais em mudas de Eucalyptus spp., tolerância ao alumínio e níveis de fósforo no solo. Viçosa, 1983. 87p. (Mestrado - Universidade Federal de Viçosa)

NOVAIS, R.F. e KAMPRATH, E.J. Fósforo recuperado em três extratores químicos como função do fósforo aplicado no solo e do "fator capacidade". R. bras. Ci. Solo, Campinas, 3:41-6, 1979.

NOVAIS, R.F. Phosphorus supplying capacity of previously heavily fertilized soils. Raleigh, 1977. 153p. (Ph.D. - North Carolina State University).

OLIVEIRA, I.P.; THUNG, M.D.T. Nutrição mineral. In: ZIMMERMANN, M.J.D.de; ROCHA, M. e YAMADA, T., ed. Cultura do feijoeiro: fatores que afetam a produtividade. Piracicaba, Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1988. p.175-212.

OLIVEIRA, I.P.; THUNG, M.D.T.; KLUTHCOUSKI, J.; AIDAR, H. e CARVALHO, J.R.P. de. Avaliação de cultivares de feijão quanto à eficiência no uso de fósforo. Pesq. agropec. bras., Brasília, 22 (1): 1-113, 1987.

OLSEN, S.R. Micronutrient interactions. In: MORTVEDT, J.J.; GIORDANO, P.M. e LINDSAY, W.L. ed. Micronutrients in agriculture, Madison, Soil Science Society of America Inc., 1972, p.243-264.

OLSEN, S.R.; KEMPER, W.D. e JACKSON, R.D. Phosphate diffusion to plant roots. Proc. Soil Sci. Soc. Amer., Madison, 26: 222-227, 1962.

OZANE, P.G. e SHAW, T.C. Phosphate sorption by soils as a measure of phosphate requirement for pasture growth. Aust. J. Agric. Res. Melbourn, 18: 601-12, 1967.

OZANE, P.G. e SHAW, T.C. Phosphate sorption by soils as a measure of phosphate requirement for pasture growth. Aust. J. Agric. Res., Melbourne, 18: 601-12, 1967.

PÉREZ MÉNDEZ, J.A.; GUTIERREZ, F.; FERNANDEZ, E. e TRUJILLO, J.C. Etude comparative de méthodes pour la détermination du phosphore total dans différents types d'andosols. Science du Sol, 4: 241-250, 1978.

PÉREZ, A.J.L. e NEPTUNE, A.M.L. Efeito do fósforo e de doses deste nutriente em alguns solos do Estado de São Paulo na cultura do milho (Zea mays, L.). O Solo, Piracicaba, 79: 61-68, 1988.

PÉREZ, A.J.L. e NEPTUNE, A.M.L. Extração de várias formas de fósforo em alguns solos do Estado de São Paulo, utilizando vários métodos químicos. Anais da E.S.A. "Luiz de Queiroz", Piracicaba, XLIV: 1037-1077, 1987.

RAIJ, B. Van; QUAGIO, J.A.; CANTARELLA, H.; FERREIRA, M.E.; LOPES, A.S. e BATAGLIA, O.C. Extração de elementos, com resina trocadora de íons e soluções diversas, p. 101. In: Análise química do solo para fins de fertilidade. Campinas, Fundação Cargil, 1987. 170p (Boletim 81).

RAIJ, B.V. e QUAGIO, J.A. Métodos de análise do solo para fins de fertilidade. Campinas, Instituto Agrônomo de Campinas. 1983. 31 p. (Boletim Técnico, 7).

RAIJ, B.Van. Avaliação da fertilidade do solo. Instituto da Potassa e Fosfato (EUA), Instituto Internacional da Potassa (Suíça), 1983. 142p.

ROSOLEM, C.A. Nutrição e adubação do feijoeiro. Piracicaba, Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1987. 93p. (Boletim Técnico, 8).

RUIZ, H.A. Efeito do conteúdo de água sobre o transporte de fósforo em dois latossolos. Viçosa, 1986. 86p. (Doutorado - Universidade Federal de Viçosa).

SÁ, J.P.M.; ARAÚJO, S.M.C.; GALVÃO, S.J.; VASCONCELOS, A.L. de e OLIVEIRA, E.S.C. Evaluation of methods of chemical analysis for available phosphorus in soils of the "Zona Litoral-Mata" of Pernambuco. Pesq. agropec. bras., Brasília, 9(9): 27-33, 1974.

SANCHEZ, P.A. e UERARA, G. Management considerations for acid soils with high phosphorus fixation capacity. In: KHASAWNEH, F.E.; SAMPLE, E.C. e KAMPRATH, E. J. The role of phosphorus in agriculture. Madison, American Society of Agronomy, 1980. p. 471-54.

SILVEIRA, P.M. da e MOREIRA, J.A.A. Respostas do Feijoeiro a doses de fósforo e lâminas de água de irrigação. R. bras. Ci. Solo, Campinas, 14: 63-67, 1990.

SMITH, A.N. Fractionation of inorganic phosphorus in soils, the Chang and Jackson fractionation procedure; its limitations and uses. Agri digest, 17: 10-19, 1970.

SMITH, F.W. e JACKSON, W.A. Nitrogen enhancement of phosphate transport in roots of *Zea mays* L. II. Kinetic and inhibitor studies. Plant Physiology, **84**(4): 1319-1324, 1987.

SUMNER, M.E. Interpretation of foliar analyses for diagnostic purposes. Agron. J., Madison, **71**: 343-348, 1979.

VASCONCELOS, A.A.; BRAGA, J.M.; NOVAIS, F.R. e PINTO, O.C.B. Fósforo em dois latossolos do Estado do Mato Grosso: I. sorção de fosfato. Experientiae, Viçosa, **18**(12): 267-85, 1974.

VASCONCELOS, A.A.; BRAGA, J.M.; NOVAIS, F.R. e PINTO, O.C.B. Fósforo em dois latossolos do Estado de Mato Grosso: II. dessorção de fosfatos. R. Ceres, Viçosa, **22**(119): 62-73, 1975.

VIDOR, C. e FREIRE, J.R.J. Calibração de análise de solo para cultura da soja (*Glycine max* (L.) Merrill). Agron. Sulrio-grandense, Porto Alegre, **7**: 63-72, 1971.