

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA**

**Fósforo em solos de fertilidade construída: capacidade tampão e  
disponibilidade**

Geovani do Carmo Copati da Silva  
*Doctor Scientiae*

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2025**

**GEOVANI DO CARMO COPATI DA SILVA**

**Fósforo em solos de fertilidade construída: capacidade tampão e disponibilidade**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientador: Reinaldo B. Cantarutti

Coorientador: Julio Cesar Lima Neves

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2025**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

S586f  
2025  
Silva, Geovani do Carmo Copati da, 1991-  
Fósforo em solos de fertilidade construída: capacidade  
tampão e disponibilidade / Geovani do Carmo Copati da Silva. –  
Viçosa, MG, 2025.  
66 f.: il. (algumas color.).

Orientador: Reinaldo Bertola Cantarutti.  
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa,  
Departamento de Solos, 2025.  
Referências bibliográficas: f.63-66.  
Modo de acesso: World Wide Web.

1. Solos - Análise. 2. Fertilizantes fosfatados. 3. Plantas -  
Efeito do fósforo. I. Cantarutti, Reinaldo Bertola, 1954-.  
II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Solos.  
Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas.  
III. Título.

CDD 22. ed. 631.42

**GEOVANI DO CARMO COPATI DA SILVA**

**Fósforo em solos de fertilidade construída: capacidade tampão e disponibilidade**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 27 de junho de 2025.

Assentimento:

---

Geovani do Carmo Copati da Silva  
Autor

---

Reinaldo Bertola Cantarutti  
Orientador

Essa tese foi assinada digitalmente pelo autor em 02/03/2026 às 12:22:05 e pelo orientador em 02/03/2026 às 16:38:09. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **NDUG.75Z3.1JJT** e clique no botão 'Validar documento'.

À Mariane e à Sara,  
Aos meus pais,  
Aos meus sogros,  
À Marcela e ao Luciano,  
Ao Arthur, Ana Luísa, Helena e Murilo,

## AGRADECIMENTOS

A Deus, fonte de toda sabedoria.

Aos meus pais, por todo amor e carinho.

À minha amada esposa Mariane, por me fazer acreditar que seria possível.

À minha filha Sara, cuja chegada me fortaleceu no momento mais crítico.

Ao orientador, professor Reinaldo Bertola Cantarutti, minha inspiração como pai e servidor público. Agradeço pela orientação para a tese e para a vida.

Ao coorientador, professor Júlio César Lima Neves, agradeço pelas valiosas sugestões e pelas aulas inspiradoras.

Ao coorientador, professor Victor Hugo Alvarez V. (in memoriam), pelo auxílio na concepção do projeto e pela dedicação à ciência.

À UFV, ao DPS, ao PPGSNP e à Capes pela possibilidade de realizar o curso.

A todos os professores que tive em minha trajetória acadêmica.

Aos meus colegas servidores técnicos administrativos, em especial, Humberto, João Milagres, Marcos e Zélia pela ajuda nos experimentos de casa de vegetação; à Adriana pelo apoio nas análises no ICP; ao Cláudio pela ajuda com as análises físicas e à Carol e o Nayan pelo auxílio com os processos e informações sobre o PPGSNP.

Ao padrinho Júlio, pela amizade e incentivo.

Ao amigo Josimar e ao professor Paulo Cecon pela ajuda com as análises estatísticas.

À Mikaela, Alexandre, Santiago e Gustavo pela ajuda na condução dos experimentos.

Aos meus amigos do Laboratório de Rotina, Fernando, Jaqueline, Vicente, Mariana, Poliana, Beto, Guilherme, Edson e Helderson por todo apoio.

Ao professor Wedisson, Polliana, Rodrigo Lima e à SNP consultoria pela ajuda na coleta das amostras.

A todos produtores rurais que permitiram a coleta de solos em suas propriedades.

Ao povo brasileiro, pelo patrocínio da minha educação formal.

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

## RESUMO

SILVA, Geovani do Carmo Copati da, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, junho de 2025. **Fósforo em solos de fertilidade construída: capacidade tampão e disponibilidade.** Orientador: Reinaldo Bertola Cantarutti. Coorientador: Julio Cesar Lima Neves.

Solos brasileiros, sobretudo os do Cerrado, são altamente intemperizados, pobres em fósforo (P) disponível e apresentam grande capacidade tampão de fosfatos (CTP), comportando-se como “dreno” deste nutriente e limitando a produção vegetal. A adubação fosfatada contínua leva ao acúmulo de P, transformando o solo num sistema mais “fonte” e possivelmente reduzindo o tamponamento de fosfato e a importância dos seus indicadores para o entendimento da dinâmica do elemento. Para testar essa hipótese, foram avaliados os fatores Quantidade (Q), Intensidade (I) e Capacidade (FCP) de P em 28 solos, 14 de áreas de fertilidade construída (SFC), com P acima do nível crítico, e 14 de áreas nativas (SFN) coletados nos biomas Cerrado e Mata Atlântica. Foram determinados o potencial de fosfato monocálcico no solo ( $I_0$ ) e os indicadores do FCP, como a CTP, a capacidade máxima de adsorção de fosfato (CMAP), a contante relacionada à energia de ligação, o fator capacidade máximo de P ( $FCP_{máx}$ ), além do fósforo remanescente (P-rem) em cinco concentrações (15, 30, 45, 60 e 75 mg L<sup>-1</sup>). Também se determinou a concentração de enxofre no extrato de Mehlich-1 (S-M1) dos solos. Em casa de vegetação, cultivou-se milho por 40 dias em sete pares de solos (SFN e SFC), com e sem P aplicado, e quantificou-se a produção de matéria seca, teor e conteúdo de P na parte aérea e taxas de recuperação de P pela planta e pelos extratores Mehlich-1 e Resina, além do coeficiente de utilização. Nos SFC, em comparação aos respectivos SFN do mesmo local, observou-se reduções na CTP, CMAP, energia de ligação de P,  $FCP_{máx}$  e aumento nos valores de P-rem, evidenciando menor tamponamento. O P-rem, diferentemente da proporção de argila, se mostrou eficiente para detectar as alterações no FCP. Os valores de  $I_0$  e o desgaste químico do extrator Mehlich-1 foram menores nos SFC, sobretudo naqueles originalmente mais tamponados, mas ainda se mostraram dependentes do FCP. Os SFC também apresentaram maiores teores de P disponível e proporcionaram maiores produção e acúmulo de P nas plantas, mesmo sem nova adubação, além de menor resposta ao fertilizante, evidenciando maior fator Quantidade (Q) de P. A constante relacionada à energia de ligação foi o único índice do FCP que se correlacionou fortemente com crescimento e acúmulo de P nas plantas cultivadas. Embora a produção vegetal tenha se tornado menos sensível

ao tamponamento, tanto a recuperação de P pela planta quanto pelo Mehlich-1 permaneceram dependentes do FCP e os indicadores de eficiência de uso do P continuaram condicionados ao tamponamento. Os resultados confirmam que a construção de fertilidade altera a dinâmica do P, reduzindo a relevância do FCP para a produtividade, mas mantendo sua relevância na eficiência do uso do nutriente.

Palavras-chave: Fósforo no solo; capacidade tampão de fosfato; P-remanescente; eficiência de uso do P; solos tropicais

## ABSTRACT

SILVA, Geovani do Carmo Copati da, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, June, 2025. **Phosphorus in constructed fertility soils: buffering capacity and availability.** Adviser: Reinaldo Bertola Cantarutti. Co-adviser: Julio Cesar Lima Neves.

Brazilian soils, particularly those of the Cerrado region, are highly weathered, low in available phosphorus (P), and exhibit a high phosphate buffering capacity (PBC), behaving as a “sink” for this nutrient and thereby limiting plant production. Continuous phosphate fertilization leads to phosphorus (P) accumulation, transforming the soil into a more “source”-like system and potentially reducing phosphate buffering capacity, as well as the relevance of its indicators for understanding P dynamics in the soil. This study aimed to test this hypothesis by evaluating the Quantity (Q), Intensity (I), and Capacity (PCF) factors in 28 soil samples—14 from cultivated areas with P levels above the critical level (SBF) and 14 from native, unfertilized áreas (NAS) - collected from the Cerrado and Atlantic Forest biomes. The soil monocalcium phosphate potential (I) and the indicators of phosphorus capacity factor (PCF) were determined, including phosphate buffering capacity (PBC), maximum phosphate adsorption capacity (MPAC), the constant related to binding energy, the maximum phosphorus capacity factor (PBC), as well as remaining phosphorus (rem-P) at five concentrations (15, 30, 45, 60, and 75 mg L<sup>-1</sup>). Sulfur concentration in the Mehlich-1 extract (S-M1) of the soils was also determined. In a greenhouse experiment, maize was grown for 40 days in seven paired soils (NAS and SBF), with and without P application. Dry matter yield, P concentration and P content in the shoot were quantified, as well as P recovery rates by the plant and by the Mehlich-1 and Resin extractors, in addition to the P utilization efficiency coefficient. In the SBF, compared with their respective NAS from the same location, reductions were observed in PBC, MPAC, P binding energy, and PBC, along with increases in P-rem values, indicating reduced buffering. Unlike clay content, P-rem proved to be effective in detecting changes in PCF. The I values and the chemical depletion of the Mehlich-1 extractor were lower in the SBF, particularly in those originally more buffered soils, although they still remained dependent on PCF. The SBF also showed higher levels of available P and promoted greater plant biomass production and P accumulation, even without additional fertilization, as well as a lower response to applied fertilizer, indicating a greater phosphorus Quantity (Q) factor. The constant related to binding energy was the only PCF index that showed a strong correlation with plant growth and P accumulation in the

cultivated plants. Although plant growth became less sensitive to buffering effects, both P recovery by plants and extraction by Mehlich-1 remained dependent on PCF, and P use efficiency indicators continued to be influenced by it. Overall, the results confirm that fertility-enhanced profoundly modifies P dynamics, reducing the role of PCF in determining crop productivity but preserving its importance for evaluating nutrient use efficiency.

Keywords: Soil phosphorus; phosphate buffering capacity; remaining phosphorus; phosphorus use efficiency; tropical soils

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Localização da coleta, condições de uso e características físicas das amostras de solo. ....	17
<b>Tabela 2.</b> Atributos químicos e classe de disponibilidade de fósforo das amostras de solo de acordo com a condição de uso. ....	19
<b>Tabela 3.</b> Concentrações máxima de P, correspondente ao nível 1,00 nas soluções empregadas para a determinação dos fatores intensidade (I) e capacidade tampão de fosfato (CTP) de solos de fertilidade construída (SFC) e solos de fertilidade natural (SFN). ....	22
<b>Tabela 4.</b> Concentração de P para determinação da capacidade máxima de adsorção de fosfato (CMAP), a constante relacionada à energia de ligação e o Fator Capacidade de P Máximo (FCP <sub>máx</sub> ) de solos de fertilidade construída (SFC) e solos de fertilidade natural (SFN). ....	25
<b>Tabela 5.</b> Doses de P definidas para cada solo, independentemente da condição de uso, estabelecida de acordo com o P-rem dos solos de fertilidade natural (SFN), correspondendo ao nível 0,5 das da dose máxima proposta por Alvarez V. et al. (2000). ....	28
<b>Tabela 6:</b> Indicadores da disponibilidade e tamponamento de fosfato em solos de fertilidade natural (SFN) e fertilidade construída (SFC). ....	31
<b>Tabela 7.</b> Equações da forma Linear de região única da Isoterma de Langmuir de solos de fertilidade natural (SFN) e construída (SFC). ....	33
<b>Tabela 8.</b> Capacidade Máxima de Adsorção de Fosfato (CMAP), constante relacionada à energia de ligação (Energia), fator capacidade máximo de P (FCP <sub>máx</sub> ) de solos de fertilidade natural (SFN) e construída (SFC). ....	34
<b>Tabela 9.</b> Equações de regressão para a variação do potencial de fosfato (0,5 pCa + pH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) em função da quantidade de P adsorvida (q) em amostras de solos de fertilidade natural (SFN) e construída (SFC). ....	37
<b>Tabela 10.</b> Fator intensidade (I <sub>0</sub> ) e P adsorvido no ponto de mudança de região da curva (q <sub>MR</sub> ) que descreve a variação do fator intensidade (I) em relação a ao P adsorvido (q) nos em amostras de solos de fertilidade natural (SFN) e construída (SFC). ....	39
<b>Tabela 11.</b> Coeficientes de correlação linear simples entre o Potencial de fosfato no solo (I <sub>0</sub> ) e indicadores do FCP em solos de fertilidade natural (SFN) e construída (SFC). ....	40
<b>Tabela 12.</b> Capacidade Tampão de Fosfato no Ponto de mudança de região (CT <sub>MR</sub> ) e em 20 mol de P 10 <sup>-8</sup> g <sup>-1</sup> (CT <sub>20</sub> ) em solos de fertilidade natural (SFN) e construída (SFC). ....	43
<b>Tabela 13.</b> Equações de regressão para a variação da atividade de P (Ŷ) em função da quantidade de P adsorvida (x) em solos de fertilidade natural (SFN) e construída (SFC). ....	44

<b>Tabela 14.</b> Atividade de P do solo ( $P_0$ ), ponto de mudança de região ( $q_{MR}$ ), Capacidade Tampão de Fosfato no $q_{MR}$ ( $CT_{MR}$ ) e em 200 mol de P $10^{-8}$ g $^{-1}$ ( $CT_{200}$ ) em solos de fertilidade natural (SFN) e construída (SFC). .....	45
<b>Tabela 15.</b> Concentração de fósforo remanescente (P-rem) na solução de equilíbrio de em solos de fertilidade natural (SFN) e construída (SFC) após a adição de solução contendo 15, 30, 45, 60 e 75 mg L $^{-1}$ de P. ....	46
<b>Tabela 16.</b> Coeficientes de correlação linear simples entre o fósforo remanescente (P-rem), nas concentrações de P de 15, 30 45, 60 e 75 mg L $^{-1}$ , e a proporção de argila e os demais indicadores do FCP em solos de fertilidade natural (SFN) e construída (SFC). .....	48
<b>Tabela 17.</b> Concentração de enxofre no extrato de Mehlich-1 (S-M1) de amostras de solos de fertilidade natural (SFN) e construída (SFC). ....	50
<b>Tabela 18.</b> Coeficientes de correlação linear simples entre indicadores do FCP e a concentração de enxofre no extrato de Mehlich-1 (S-M1) de amostras de solos de fertilidade natural (SFN) e construída (SFC). .....	51
<b>Tabela 19.</b> Produção de matéria seca (mMS_PA) e o conteúdo de P na parte aérea (cP-PA) de plantas cultivadas sem adubação fosfatada em solos de fertilidade natural (SFN) e construída (SFC). .....	52
<b>Tabela 20.</b> Produção de matéria seca (mMS_PA) e conteúdo de P na parte aérea (cP-PA) de plantas cultivadas com adubação fosfatada em solos de fertilidade natural (SFN) e construída (SFC). ....	53
<b>Tabela 21.</b> Produção relativa de matéria seca de parte aérea (PR) e taxa de recuperação de P ( $tr_{Pl}$ ) pelas plantas em solos de fertilidade natural (SFN) e construída (SFC). ....	55
<b>Tabela 22.</b> Índice de utilização de P, segundo Siddiqi e Glass (1981), de plantas cultivadas com e sem adubação fosfatada em solos de fertilidade natural (SFN) e construída (SFC). ..	56
<b>Tabela 23.</b> Teores de P disponível pelos extratores Mehlich-1 ( $tP_{M1}$ ) e Resina mista ( $tP_{Res}$ ) em solos de fertilidade natural (SFN) e construída (SFC) não adubados e adubados com fertilizante fosfatado. ....	57
<b>Tabela 24.</b> Taxa de recuperação de P pelos extratores Mehlich-1 (M-1) e Resina mista (Resina) em solos de fertilidade natural (SFN) e construída (SFC). .....	58
<b>Tabela 25.</b> Coeficientes de correlação linear simples entre os teores de P disponível pelos extratores Mehlich-1 e Resina mista (Resina) e o conteúdo de P de plantas cultivadas em solos de fertilidade natural (SFN) e construída (SFC) não adubados e adubados com fertilizantes fosfatado. ....	58

**Tabela 26.** Coeficientes de correlação linear simples entre as taxas de recuperação de P dos extratores (tr\_Ext) Mehlich-1 e Resina mista (Resina) e a taxa de recuperação de P pelas plantas (tr\_Pl) cultivadas em solos de fertilidade natural (SFN) e construída (SFC). ....59

**Tabela 27.** Coeficientes de correlação linear simples entre indicadores do FCP e a Produção de matéria seca (mMS\_PA) e conteúdo de P na parte aérea (cP-PA) de plantas cultivadas com adubação fosfatada, taxa de recuperação de P de plantas (tr\_Pl) e pelos extratores Mehlich-1 (tr\_M1) e resina mista (tr\_res).....60

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	13
2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	15
2.1 Amostras de solos.....	15
2.2 Preparo das amostras .....	16
2.3 Fatores intensidade (I) e capacidade tampão de fosfato (CTP).....	21
2.4 Cálculo da capacidade tampão de fosfato (CTP).....	23
2.5 Isotermas de Adsorção de Fosfato .....	24
2.6 Fósforo remanescente (P-rem) nas concentrações 15, 30, 45, 60 e 75 mg L <sup>-1</sup> .....	25
2.7 Concentração de enxofre no extrato de Mehlich-1 .....	26
2.8 Cultivo de plantas de milho em casa de vegetação .....	26
2.9 Análises estatísticas.....	29
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	29
3.1 Disponibilidade e tamponamento de fósforo em solos de fertilidade natural e construída: indicadores da análise química de rotina .....	29
3.2 Isotermas de adsorção de P, CMAP, “Energia de Ligação” e Fator Capacidade Máximo de P .....	33
3.3 Potencial de Fosfato (I) e Capacidade Tampão de Fosfato (CTP) .....	36
3.3.1 Equações do Potencial de Fosfato (I) em função do P adsorvido.....	36
3.3.2 Fator Intensidade (I <sub>0</sub> ) e valor de q no ponto de “mudança de região” (q <sub>MR</sub> ) na curva I=f(q).....	38
3.3.3 Capacidade Tampão no q <sub>MR</sub> (CT <sub>MR</sub> ) e em 20 mol de P 10 <sup>-8</sup> g <sup>-1</sup> (CT <sub>20</sub> ).....	41
3.4 Fósforo remanescente (P-rem) nas concentrações de equilíbrio de 15, 30, 45, 60 e 75 mg L <sup>-1</sup> .....	45
3.5 Concentração de enxofre (S-M1) no extrato de Mehlich-1.....	50
3.6 Resposta de plantas à adubação em solos cultivados e não cultivados .....	52
3.6.1 Crescimento e acúmulo de P na parte aérea de plantas .....	52
3.6.2 Produção Relativa, taxa de recuperação pelas plantas e eficiência do uso do P .....	54
3.6.3 Teores de P disponíveis pelos extratores Mehlich-1 e Resina Mista.....	56
3.6.4 Importância dos índices do FCP para predição da dinâmica do P em solos cultivados .....	59
4. CONCLUSÕES.....	62
5. BIBLIOGRAFIA.....	63

## 1. INTRODUÇÃO

O solo é o substrato a partir do qual as plantas absorvem água e nutrientes, além de se sustentarem fisicamente. Quando as reservas nutricionais do solo são suficientes para o pleno desenvolvimento vegetal, têm-se a condição de solo “fonte”. No entanto, há situações em que algumas características do solo fazem com que haja competição pelos nutrientes entre o solo e as plantas, o que pode inviabilizar o crescimento vegetal, o que constitui um solo “dreno” (Novais e Smyth, 1999).

Os solos brasileiros, especialmente os do bioma cerrado, em sua maioria, são altamente intemperizados, ricos em minerais caulíníticos e óxidos de ferro e alumínio. Esses solos, geralmente, apresentam elevada acidez e baixa disponibilidade (pequeno fator quantidade “Q”) de bases trocáveis e ânions como sulfato e fosfato (Lopes e Guilherme, 2016).

Além disso, principalmente aqueles mais argilosos, são caracterizados pelos elevados valores de capacidade máxima de adsorção de fosfato (CMAP) e energia de adsorção do fósforo (P) na fase sólida, além de baixa atividade de fosfato na solução do solo (fator intensidade “I”). Nestes solos, os expressivos valores de capacidade tampão de fosfatos (CTP) evidenciam um elevado fator capacidade (FCP, Q/I) (Bahia Filho, 1974; Lopes, 1977; Bahia Filho, 1982).

Essas condições conferem a esses solos acentuada característica de “dreno” de P, em razão da elevada capacidade de adsorção e retenção do nutriente na fase sólida. Como consequência, o fósforo configura-se como o elemento mais limitante à produção vegetal em ambientes tropicais e, por isso, tem sido amplamente investigado, com numerosos estudos voltados à proposição de estratégias de manejo que viabilizem maior eficiência de uso e superem as limitações impostas pelas condições químicas adversas desses solos (Novais, Smyth, e Nunes, 2007).

Em solos tropicais, o pleno entendimento da dinâmica do P no solo e a interpretação da sua disponibilidade são dependentes de indicadores do FCP. Entre as propriedades e processos influenciados pelo FCP se destacam: a concentração de P na solução do solo (Rajan, 1973; Lopes, 1977; Yost et al., 1979); os níveis críticos de fósforo pelos extratores Mehlich-1 (Freire et al., 1979; Muniz et al., 1987; Alvarez et al., 1999; Reis, 2020) e Mehlich-3 (Reis, 2020); a perda do poder de extração de fósforo pelo extrator Mehlich-1 (Novais et al., 2015); as taxas de recuperação de P pelos extratores Mehlich-1, Resina (Possamai, 2003; Reis, 2020) e Mehlich-3 (Reis, 2020).

O manejo da adubação fosfatada, nesse cenário, é definido também pelo FCP. As doses recomendadas para se alcançar a máxima produção econômica são maiores em solos com elevado FCP (Alvarez et al., 1999; Reis, 2020) em consequência do relacionamento antagônico entre a taxa de recuperação, pelas plantas, do P adicionado via fertilização e FCP (Santos et al., 2008). Os efeitos da localização da adubação fosfatada são, também, mais proeminentes em solos mais tamponados (Novais e Smyth, 1999).

O crescimento vegetal também se mostra sensível ao FCP. Em solos mais tamponados e, portanto, mais restritivos ao suprimento de P, as plantas apresentam maior eficiência no uso deste nutriente, o que é verificado pelo menor nível crítico de P na parte aérea das plantas de soja (Muniz et al., 1987), alface (Fabres et al., 1987), arroz (Mello et al., 1993), tomate, batata-baroa e pepino (Novais et al., 1993).

A CTP (PBC ou DPBC em inglês) é a medida clássica do FCP. No entanto, outros indicadores como a proporção de argila, o fósforo remanescente (P-rem), a capacidade máxima de adsorção (CMAP), a contante relacionada à energia de ligação (energia) e o  $FCP_{máx}$  permitem inferências a respeito do grau de tamponamento dos solos (Bahia Filho, 1974; Novais e Smith, 1999; Ker, 1995).

A proporção de argila e o fósforo remanescente (P-rem), em virtude das suas facilidades operacionais, são os indicadores do FCP mais comumente utilizados em laboratórios de rotina. Porém, nem sempre o teor de argila apresenta boas correlações com os demais indicadores do FCP (Ker, 1995; Muniz et al., 1987). Isto acontece porque o FCP é dependente não somente da quantidade de argila, mas também de sua característica, principalmente composição mineralógica (Novais e Smyth, 1999).

Adicionalmente, verificam-se problemas de dispersão incompleta da fração argila em alguns solos tropicais (Donagemma et al., 2003), o que pode levar a subestimação na quantificação deste atributo e, conseqüentemente, comprometer, o seu uso como indicador do FCP.

Maiores e mais significativas correlações entre as propriedades e processos dependentes do FCP são frequentemente encontradas com o P-rem, cuja concentração de P na solução de equilíbrio variaram de 30 (Muniz et al., 1985) a 50 mg L<sup>-1</sup> (Novais et al., 1993; Fabres et al., 1987). Os estudos mais recentes (Santos et al., 2008; Novais et al., 2015; Reis, 2020); foram realizados com a concentração de 60 mg L<sup>-1</sup> (Alvarez V. et al., 2000) e esta tem sido a concentração adotada nos laboratórios de rotina de análise de fertilidade do solo.

A despeito de suas características químicas originalmente limitantes, solos tropicais têm sido largamente cultivados com obtenção de elevados níveis de produção, em decorrência da aplicação de corretivos e fertilizantes, principalmente fosfatados, ao longo de décadas (Lopes e Guilherme, 2016).

A contínua adubação fosfatada gera um acúmulo do nutriente no solo, o que cria uma reserva que faz com que esses solos, inicialmente pobres e com forte caráter “dreno” de P, se aproximem do caráter “fonte” desse elemento devido à elevação do status de P nesses solos, o que os caracterizam como solos de fertilidade construída (SFC). Sob essa nova condição de “fonte”, a dinâmica do fósforo no solo assume características distintas, destacando-se a menor energia de ligação do P na fase sólida e a possível redução da importância do fator capacidade de fosfato (FCP) como parâmetro explicativo do comportamento do elemento no sistema solo (Novais e Smyth, 1999).

Diante desse cenário, partindo da hipótese da menor importância dos indicadores clássicos do FCP para explicar a dinâmica do P no sistema solo-planta em solos de fertilidade construída e em face do pequeno número de estudos científicos sobre este assunto, neste trabalho foram caracterizados os fatores quantidade, intensidade e capacidade tampão, estimada a energia de adsorção, analisada a validade do P-rem 60 mg L<sup>-1</sup> como indicador da FCP e a resposta de plantas ao cultivo em solos de fertilidade construída com o objetivo de avaliar se a construção da fertilidade altera o FCP, bem como verificar a importância de índices do FCP em solos com fertilidade construída.

## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.1 Amostras de solos**

Foram coletadas amostras de solos de diferentes características químicas e físicas em 14 locais dos biomas cerrado e mata atlântica, sendo 13 locais no estado de Minas Gerais e um local no estado do Mato Grosso. Em cada local, foram coletadas uma amostra de solo em área de vegetação nativa e sem o histórico de uso agrícola, ou seja, solos com fertilidade natural (SFN) e, também, uma amostra em área cultivada com culturas anuais em sistema de cultivo mínimo ou plantio direto sendo que, quando possível, as duas áreas foram coletadas o mais próximo possível.

As áreas cultivadas foram selecionadas por apresentarem, segundo o relato dos produtores e consulta das análises químicas de anos anteriores, longo histórico de cultivos e teores de P disponível, pelo extrator Mehlich-1, superior ao nível crítico (Alvarez V. et

al., 1999), consistentemente, há pelo menos cinco anos, caracterizando, portanto, solos de fertilidade construída (SFC).

As amostras, em ambas as áreas, foram coletadas na camada de 0 - 15 cm, em quatro pontos de cada área, constituindo uma amostra composta com cerca de 60 kg em cada área.

## 2.2 Preparo das amostras

As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos e transportadas para o Departamento de Solos da UFV (DPS/UFV). Inicialmente, o volume de solo de cada amostra foi homogeneizado, seco a 40°C e passado em peneira de 2 mm, obtendo-se assim a terra fina seca em estufa (TFSE). Na sequência, uma amostra representativa de cada solo foi enviada para caracterização de atributos físicos no Laboratório de Física do Solo do DPS/UFV (Tabela 1).

A composição granulométrica dos solos foi determinada por meio da dispersão de 10 g de TFSE com NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> e agitação em agitador do tipo Wagner, 50 RPM, por 16 h. As frações areia grossa e areia fina foram separadas por peneiramento e as frações argila e silte foram determinadas pelo método da pipeta. As classes texturais foram determinadas segundo os critérios estabelecidos pela Sociedade Brasileira de Ciência do solo (SBCS).

Determinou-se, também, a densidade do solo pelo método da proveta (amostras deformadas) e o equivalente de umidade (EU). Com base no EU, estimou-se a capacidade de campo (CC) por meio da eq. 1 (Ruiz et al., 2003), a partir da qual determinou-se o volume de água destilada necessário para o umedecimento dos solos.

$$CC = 0,081 + 0,888 EU \quad R^2 = 0,910 \quad (\text{eq. 1})$$

O volume de cada solo foi umedecido até 80 % da CC, recondicionado em sacos plásticos, que foram mantidos abertos e incubados por 15 d em uma casa de vegetação. Após esse período, os solos foram secos e peneirados para se obter, novamente, a TFSE. Foram coletadas subamostras para a caracterização química de rotina (Tabela 2), segundo Lopes e Alvarez V. (1999).

**Tabela 1.** Localização da coleta, condições de uso e características físicas das amostras de solo.

Solo	Localização	Condição de uso	DS <sup>(1)</sup>	EU <sup>(2)</sup>	Argila <sup>(3)</sup>	Areia Grossa <sup>(4)</sup>	Areia Fina <sup>(4)</sup>	Silte	Classe Textural <sup>(5)</sup>
			kg dm <sup>-3</sup>	g kg <sup>-1</sup>	kg kg <sup>-1</sup>	kg kg <sup>-1</sup>	kg kg <sup>-1</sup>	kg kg <sup>-1</sup>	kg kg <sup>-1</sup>
1	Fazenda Pontal	SFC	1,31	90	0,238	0,473	0,275	0,014	Franco-Argilo-Arenosa
	João Pinheiro - MG	SFN	1,35	60	0,164	0,64	0,194	0,002	Franco-Arenosa
2	CEPET - UFV	SFC	1,28	170	0,423	0,275	0,224	0,079	Argilo-Arenosa
	Capinópolis - MG	SFN	1,29	160	0,342	0,415	0,175	0,068	Franco-Argilo-Arenosa
3	Fazenda Austrália	SFC	0,98	310	0,644	0,161	0,058	0,137	Muito Argilosa
	Uberlândia - MG	SFN	0,95	280	0,754	0,089	0,033	0,124	Muito Argilosa
4	Fazenda Liberdade	SFC	0,99	310	0,592	0,098	0,044	0,265	Argila
	Madre de Deus - MG	SFN	0,98	320	0,607	0,073	0,049	0,271	Muito Argilosa
5	EMBRAPA	SFC	0,96	310	0,754	0,076	0,022	0,147	Muito Argilosa
	Sete Lagoas - MG	SFN	0,96	330	0,751	0,079	0,037	0,133	Muito Argilosa
6	Fazenda Cruzeiro	SFC	1,29	150	0,350	0,374	0,242	0,035	Argilo-Arenosa
	Uberlândia - MG	SFN	1,28	110	0,216	0,396	0,304	0,083	Franco-Argilo-Arenosa
7	Fazenda Nô da Silva	SFC	1,01	270	0,592	0,224	0,092	0,092	Argila
	Cajuri - MG	SFN	1,02	270	0,619	0,230	0,092	0,059	Muito Argilosa
8	Fazenda Bom Retiro	SFC	1,29	170	0,299	0,462	0,216	0,023	Franco-Argilo-Arenosa
	Pres. Olegário - MG	SFN	1,29	130	0,316	0,508	0,147	0,029	Franco-Argilo-Arenosa
9	Fazenda Farroupilha	SFC	1,10	260	0,609	0,170	0,091	0,13	Muito Argilosa
	Pres. Olegário - MG	SFN	1,10	210	0,623	0,269	0,086	0,021	Muito Argilosa

18

Solo	Localização	Condição de uso	DS <sup>(1)</sup> kg dm <sup>-3</sup>	EU <sup>(2)</sup> g kg <sup>-1</sup>	Argila <sup>(3)</sup>	Areia Grossa <sup>(4)</sup>	Areia Fina <sup>(4)</sup>	Silte	Classe Textural <sup>(5)</sup>
10	Fazenda Palmares Itiquira -MT	SFC	1,08	280	0,740	0,138	0,062	0,060	Muito Argilosa
		SFN	1,05	200	0,577	0,308	0,081	0,034	Argila
11	Fazenda Gameleira João Pinheiro -MG	SFC	1,09	270	0,758	0,06	0,044	0,139	Muito Argilosa
		SFN	0,95	300	0,693	0,082	0,041	0,184	Muito Argilosa
12	UEPE Horta Velha DAA UFV Viçosa - MG	SFC	0,99	430	0,698	0,061	0,031	0,209	Muito Argilosa
		SFN	0,92	390	0,620	0,09	0,042	0,248	Muito Argilosa
13	Fazenda Pampa Pres. Olegário - MG	SFC	1,29	210	0,513	0,29	0,136	0,061	Argila
		SFN	1,31	170	0,382	0,392	0,176	0,049	Argilo-Arenosa
14	Fazenda Cantagalo Teixeiras - MG	SFC	0,93	390	0,642	0,079	0,04	0,239	Muito Argilosa
		SFN	0,85	430	0,696	0,035	0,032	0,237	Muito Argilosa

SFC: solo de fertilidade construída; SFN: solo de fertilidade natural; <sup>(1)</sup> DS: densidade do solo pelo método da proveta (amostras deformadas); <sup>(2)</sup> Equivalente de Umidade; <sup>(3)</sup> Método da pipeta após agitação lenta; <sup>(4)</sup> Obtidos por peneiramento; <sup>(5)</sup> Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.

**Tabela 2.** Atributos químicos e classe de disponibilidade de fósforo das amostras de solo de acordo com a condição de uso.

Solo	Condição de uso	pH H <sub>2</sub> O	P mg dm <sup>-3</sup>	P-rem mg L <sup>-1</sup>	Classe P	K mg dm <sup>-3</sup>	T -----cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----	H+Al	SB dm <sup>-3</sup>	t -----	V -----%	m	MO dag kg <sup>-1</sup>	S	B	Cu	Mn	Fe	Zn
1	SFC	5,88	50,4	43,4	Muito Boa	119	6,74	2,20	4,54	4,54	67,4	0,0	1,69	18,80	1,32	1,68	43,2	51,1	13,11
	SFN	4,54	5,7	38,0	Muito Baixa	42	5,08	4,00	1,08	1,61	21,3	32,9	6,94	15,70	0,43	0,31	33,9	69,8	6,47
2	SFC	7,18	27,1	22,6	Muito Boa	45	6,76	1,00	5,76	5,76	85,2	0,0	1,57	15,60	0,33	3,08	64,4	39,4	3,06
	SFN	4,79	1,3	24,0	Muito Baixa	48	8,95	5,50	3,45	3,65	38,5	5,5	2,95	7,40	0,33	1,84	31,2	77,8	1,41
3	SFC	6,32	14,8	12,3	Boa	300	10,69	3,20	7,49	7,49	70,1	0,0	6,10	3,40	0,62	0,86	23,8	24,6	14,52
	SFN	4,44	0,6	10,9	Muito Baixa	58	8,30	6,90	1,40	1,85	16,9	24,3	4,68	0,00	0,42	0,73	7,4	54,4	0,50
4	SFC	6,94	32,5	13,5	Muito Boa	316	9,97	1,50	8,47	8,47	85,0	0,0	5,16	7,50	0,92	1,24	22,3	13,4	9,93
	SFN	6,69	2,6	6,0	Muito Baixa	99	8,73	1,40	7,33	7,33	84,0	0,0	5,49	0,00	0,30	1,46	14,4	17,6	1,61
5	SFC	6,61	47,7	18,9	Muito Boa	351	11,70	1,90	9,80	9,80	83,8	0,0	4,29	2,30	0,74	0,61	28,3	15,0	19,86
	SFN	5,42	6,8	7,3	Baixa	64	10,22	7,20	3,02	3,20	29,5	5,6	6,19	0,00	0,40	0,88	30,2	61,8	1,03
6	SFC	6,99	63,5	27,0	Muito Boa	131	6,47	1,00	5,47	5,47	84,5	0,0	2,55	4,60	0,38	0,75	37,1	40,8	25,02
	SFN	5,46	6,4	20,4	Muito Baixa	72	6,65	4,60	2,05	2,19	30,8	6,4	3,08	16,40	0,38	1,81	18,1	424,8	3,29
7	SFC	5,82	197,9	40,8	Muito Boa	944	15,48	4,20	11,28	11,2	72,9	0,0	7,34	15,40	1,71	1,72	32,6	49,7	19,07
	SFN	3,74	3,4	17,5	Muito Baixa	66	9,93	9,60	0,33	2,64	3,3	87,5	5,87	22,20	0,63	1,15	4,5	128,5	0,74
8	SFC	6,47	26,5	33,3	Boa	133	6,24	1,60	4,64	4,64	74,4	0,0	2,20	32,30	0,88	1,42	42,8	31,7	18,50
	SFN	3,95	2,7	19,6	Muito Baixa	46	8,66	8,10	0,56	1,96	6,5	71,4	3,08	32,30	0,58	0,63	5,3	101,7	0,91
9	SFC	6,31	21,4	16,7	Boa	268	10,28	2,80	7,48	7,48	72,8	0,0	4,34	43,80	0,54	1,86	23,6	23,0	14,25
	SFN	4,67	0,9	17,5	Muito Baixa	58	9,49	8,20	1,29	1,84	13,6	29,9	4,32	10,50	0,56	0,93	4,9	55,8	1,35
10	SFC	6,08	16,8	22,2	Boa	147	9,74	3,40	6,34	6,34	65,1	0,0	3,97	8,90	0,86	1,07	14,7	20,3	3,33
	SFN	3,88	1,2	8,8	Muito Baixa	56	11,27	10,40	0,87	2,45	7,7	64,5	4,36	0,00	0,51	0,48	20,3	125,4	0,44
11	SFC	6,34	39,1	22,2	Muito Boa	353	9,79	3,00	6,79	6,79	69,4	0,0	2,43	14,20	0,90	1,14	56,4	43,6	4,59
	SFN	4,72	1,4	13,3	Muito Baixa	339	10,67	7,80	2,87	3,90	26,9	26,4	4,46	5,90	0,53	1,11	34,0	83,2	1,48
12	SFC	5,07	66,3	26,7	Muito Boa	207	10,07	6,00	4,07	4,21	40,4	3,3	3,69	9,70	1,07	5,78	148,8	50,4	7,39
	SFN	5,28	2,2	24,8	Muito Baixa	255	11,11	4,70	6,41	6,41	57,7	0,0	6,32	0,50	0,42	1,27	143,7	32,1	5,95

Solo	Condição de uso	pH H <sub>2</sub> O	P	P-rem	Classe P	K	T	H+Al	SB	t	V	m	MO	S	B	Cu	Mn	Fe	Zn
13	C	7,23	12,6	10,1	Boa	53	8,56	0,70	7,86	7,86	91,8	0,0	3,39	26,60	0,60	1,50	40,9	30,6	18,79
	NC	5,14	3,3	15,6	Muito Baixa	87	9,69	7,50	2,19	2,45	22,6	10,6	3,12	4,20	0,36	2,46	6,0	53,3	0,99
14	SFC	5,79	114,6	45,0	Muito Boa	830	15,40	3,30	12,10	12,10	78,6	0,0	5,85	45,00	1,12	2,69	34,0	36,9	15,57
	SFN	4,29	9,4	27,7	Baixa	123	15,41	10,10	5,31	5,90	34,5	10,0	9,13	18,60	0,91	2,70	73,3	139,1	4,93

SFC: solo de fertilidade construída; SFN: solo de fertilidade natural; pH H<sub>2</sub>O: Relação solo: água 1:2,5; P, K, Cu, Mn, Fe e Zn - Extrator Mehlich-1; Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e Al<sup>3+</sup> - Extrator KCl 1,0 mol/L (Al<sup>3+</sup> dosagem titulométrica); H + Al - Extrator Acetato de Cálcio 0,5 mol/L (pH 7,0 e dosagem titulométrica); SB - Soma de Bases Trocáveis; t - Capacidade de Troca Catiônica Efetiva; T - Capacidade de Troca Catiônica a pH 7,0; V - Saturação por Bases; m - Saturação por Al; MO - Matéria Orgânica = C. Org × 1,724 (Walkley-Black); P-rem - Fósforo Remanescente 60 mg L<sup>-1</sup>. Classe P: Classe de disponibilidade de P de acordo com o P-MI e o P-rem, segundo Alvarez et al., (1999).

### 2.3 Fatores intensidade (I) e capacidade tampão de fosfato (CTP)

Conduziu-se um experimento em laboratório, com duas repetições por amostra, onde 2,5 g de TFSE de cada amostra foram colocadas em tubos de centrífugas com capacidade de 50 mL. Foram adicionados 25 mL de solução de  $\text{CaCl}_2$  10 mmol  $\text{L}^{-1}$  contendo concentrações crescentes de P na forma de  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ , conforme o método proposto por White e Beckett (1964). Foram utilizadas oito concentrações de P para cada amostra, correspondente aos níveis 0,00; 0,10; 0,20; 0,30; 0,45; 0,60; 0,80 e 1,0, sendo que a concentração de P correspondente ao nível 1,0 foi definida, para cada solo, em função do P-rem, segundo Alvarez V. et al., (2000) (Tabela 3). A mistura solo-solução foi agitada por 1 h a 120 RPM em agitador horizontal. Posteriormente, as amostras foram centrifugadas a 3000 RPM por 12 min. Imediatamente após a centrifugação, determinou-se o pH e a concentração de P nos extratos. O P foi dosado por espectrometria de absorção molecular, conforme Braga e Defelipo (1974).

A partir dos valores de pH e das concentrações de P nos extratos, foram calculados a força iônica, coeficiente de atividade, atividade de  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  e, finalmente, o potencial de fosfato monocálcico ( $0,5 \text{ pCa} + \text{pH}_2\text{PO}_4$ ), por meio dos procedimentos propostos por Aslyn (1954). Também foi determinada a quantidade de fósforo adsorvida (q) em cada amostra para cada concentração de P adicionada, por meio da diferença entre a quantidade inicial e final do fósforo na solução em equilíbrio.

Para se determinar a força iônica ( $\mu$ ) da solução, utilizou-se a seguinte fórmula:

$$\mu = 1/2 (\sum C_i Z_i^2)$$

onde  $C_i$  e  $Z_i$  são, respectivamente, a concentração e a valência de cada íon presente na solução. Como se utilizou uma solução de equilíbrio contendo  $\text{CaCl}_2$  10 mmol  $\text{L}^{-1}$ , desprezou-se a concentração demais elementos químicos na solução e determinou-se  $\mu$  considerando somente as concentrações de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Cl}^-$ . Portanto, o valor calculado de  $\mu$  foi 0,03 mol  $\text{L}^{-1}$ .

Com base no valor de  $\mu$ , determinou-se o coeficiente de atividade ( $f_i$ ) conforme a seguinte fórmula:

$$-\log f_i = [A z_i^2 (\mu)^{0,5}] / [1 + B a_i (\mu)^{0,5}]$$

onde  $a_i$  é a constante relacionada com o tamanho do íon, em angstrom ( $\text{\AA}$ );  $A = 0,509$  e  $B = 0,329$  a 25 °C;  $Z_i$  é a valência do íon e  $\mu$  é a força iônica da solução.

**Tabela 3.** Concentrações máxima de P, correspondente ao nível 1,00 nas soluções empregadas para a determinação dos fatores intensidade (I) e capacidade tampão de fosfato (CTP) de solos de fertilidade construída (SFC) e solos de fertilidade natural (SFN).

Solo	Condição de uso	Concentração máxima <sup>(1)</sup>
		mg/L
1	SFC	12,0
	SFN	16,0
2	SFC	16,0
	SFN	16,0
3	SFC	30,0
	SFN	30,0
4	SFC	30,0
	SFN	30,0
5	SFC	22,0
	SFN	30,0
6	SFC	16,0
	SFN	22,0
7	SFC	16,0
	SFN	22,0
8	SFC	16,0
	SFN	22,0
9	SFC	22,0
	SFN	22,0
10	SFC	16,0
	SFN	30,0
11	SFC	22,0
	SFN	30,0
12	SFC	16,0
	SFN	16,0
13	SFC	30,0
	SFN	22,0
14	SFC	12,0
	SFN	16,0

<sup>(1)</sup> A partir desta, foram estimadas as concentrações correspondentes os níveis 0,00; 0,10; 0,20; 0,30; 0,45; 0,60 e 0,80.

De posse dos valores de pH, da concentração de P dos extratos e de  $f_i$ , determinou-se a concentração de  $H_2PO_4^-$  nos extratos (C), conforme o equilíbrio químico abaixo:



Finalmente, determinou-se a atividade de  $H_2PO_4^-$  (a) conforme a fórmula seguinte:

$$a = f_i, C$$

Em seguida, aplicou-se o logaritmo negativo de  $a$  para se determinar  $\text{pH}_2\text{PO}_4$ . De maneira semelhante, a partir da concentração de Ca, da força iônica da solução, e do coeficiente de atividade, determinou-se a atividade de Ca ( $a_{\text{Ca}}$ ) no extrato. Em seguida, aplicou-se o logaritmo negativo de  $a_{\text{Ca}}$  e dividiu-se o valor por dois para determinar 0,5 pCA. Por fim, somou-se  $\text{pH}_2\text{PO}_4^-$  e 0,5 pCA ( $0,5 \text{ pCa} + \text{pH}_2\text{PO}_4$ ).

Ajustaram-se equações de regressão ( $n=8$ ) entre os valores calculados do potencial de fosfato monocálcico ( $Y$ ), representando o fator intensidade ( $I$ ) em função da quantidade de P adsorvida ( $x$ ), em mol de P  $10^{-8} \text{ g}^{-1}$  de solo, e que corresponde ao fator quantidade ( $Q$ ). Por extrapolação ao intervalo experimental a partir das curvas, obtiveram-se as estimativas de  $I_0$  para  $x = 0$  para obter os valores de  $I_0$  (potencial de fosfato monocálcico no solo), sendo este adotado como estimativa do fator intensidade para cada solo.

#### 2.4 Cálculo da capacidade tampão de fosfato (CTP)

A capacidade tampão de fosfato (CTP) foi calculada por meio das equações ajustadas entre o potencial de fosfato monocálcico ( $I$ ) e a quantidade de fósforo adsorvido ( $q$ ), como na equação:

$$C = -1 / (dI/dq)$$

Para ajustamentos lineares, a CTP é o inverso do coeficiente angular da reta. Para relações curvilíneas, o que indica variação nos valores da CTP, determinou-se a capacidade tampão de fosfato diferencial e o valor de  $dI/dq$  ( $CT_{20}$ ) foi calculado no ponto de tangência para  $Q = 20 \cdot 10^{-8} \text{ mol de P g}^{-1}$  de solo, de acordo com Jensen (1970). A escolha deste valor de  $q$  é feita de forma arbitrária, como proposto por Barrow (1967).

Adicionalmente, também se calculou a CTP em um ponto da curva de relacionamento entre  $I$  e  $Q$  no qual ocorre a mudança de região de adsorção (ponto de mudança na tendência da declividade), o qual foi denominado  $q_{\text{MR}}$ . O valor de  $q_{\text{MR}}$ , em mol de P  $10^{-8} \text{ g}^{-1}$  de solo, correspondente à essa mudança de tendência foi definido por um método iterativo fundamentado na variação do coeficiente de determinação  $R^2$  proposto por Braga (1972) e CTP nesse ponto foi denominada  $CT_{\text{MR}}$ .

## 2.5 Isotermas de Adsorção de Fosfato

Para obter as isotermas de adsorção de fosfato, adotou-se o procedimento proposto por Olsen e Watanabe (1957). Assim, pesou-se 2,5 g de TFSE de cada amostra, que foram colocadas em tubos de centrífugas com capacidade de 50 mL. Foram adicionados 25 mL de solução de  $\text{CaCl}_2$  10 mmol  $\text{L}^{-1}$  contendo concentrações crescentes de P na forma de  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ . Foram utilizadas dez concentrações de fósforo para cada amostra, definidas em função do P-rem, segundo Alvarez V. et al., (2000) (Tabela 4). A mistura solo-solução foi agitada por 24 h a 120 RPM em agitador horizontal, em sala com temperatura de 24 - 25 °C. Posteriormente, as amostras foram centrifugadas a 3000 RPM por 12 min e filtradas em papel de filtragem rápida. As soluções de equilíbrio foram armazenadas em geladeira. As concentrações de P nas soluções de equilíbrio ( $C$ : mg  $\text{L}^{-1}$ ) foram determinadas por espectrometria de emissão ótica em plasma induzido (ICP-OES). Este ensaio contou com duas repetições por amostra.

Foi determinada a quantidade de P adsorvida ( $x$ ), em miligrama, por massa de solo ( $m$ ), em grama ( $x/m$ : mg  $\text{g}^{-1}$ ), pela diferença entre as concentrações de P adicionadas e as remanescentes após o tempo de equilíbrio. Os dados foram ajustados à forma linear da Isoterma de Langmuir, relacionando a razão entre a concentração de equilíbrio e o P adsorvido ( $C/x/m$ : g  $\text{L}^{-1}$ ) em função da concentração de P nas soluções de equilíbrio ( $C$ : mg  $\text{L}^{-1}$ ). A partir das isotermas linearizadas e por meio dos procedimentos de cálculos propostos por Novais e Smyth (1999), determinou-se a capacidade máxima de adsorção de fosfato (CMAP: mg  $\text{g}^{-1}$ ), a constante relacionada à energia de ligação ( $L$  mg $^{-1}$ ) e o fator capacidade de P máximo ( $\text{FCP}_{\text{máx}}$ , L  $\text{g}^{-1}$ ).

**Tabela 4.** Concentração de P para determinação da capacidade máxima de adsorção de fosfato (CMAP), a constante relacionada à energia de ligação e o Fator Capacidade de P Máximo (FCP<sub>máx</sub>) de solos de fertilidade construída (SFC) e solos de fertilidade natural (SFN).

Solo	Condição de uso	Concentrações de P							
		mg L <sup>-1</sup>							
1	SFC	0,0	4,0	8,0	16,0	30,0	45,0	60,0	80,0
	SFN	0,0	6,0	12,0	24,0	40,0	60,0	85,0	110,0
2	SFC	0,0	6,0	12,0	24,0	40,0	60,0	85,0	110,0
	SFN	0,0	6,0	12,0	24,0	40,0	60,0	85,0	110,0
3	SFC	0,0	15,0	30,0	60,0	90,0	120,0	160,0	200,0
	SFN	0,0	15,0	30,0	60,0	90,0	120,0	160,0	200,0
4	SFC	0,0	15,0	30,0	60,0	90,0	120,0	160,0	200,0
	SFN	0,0	15,0	30,0	60,0	90,0	120,0	160,0	200,0
5	SFC	0,0	8,0	16,0	38,0	60,0	90,0	120,0	150,0
	SFN	0,0	15,0	30,0	60,0	90,0	120,0	160,0	200,0
6	SFC	0,0	6,0	12,0	24,0	40,0	60,0	85,0	110,0
	SFN	0,0	8,0	16,0	38,0	60,0	90,0	120,0	150,0
7	SFC	0,0	6,0	12,0	24,0	40,0	60,0	85,0	110,0
	SFN	0,0	8,0	16,0	38,0	60,0	90,0	120,0	150,0
8	SFC	0,0	6,0	12,0	24,0	40,0	60,0	85,0	110,0
	SFN	0,0	8,0	16,0	38,0	60,0	90,0	120,0	150,0
9	SFC	0,0	8,0	16,0	38,0	60,0	90,0	120,0	150,0
	SFN	0,0	8,0	16,0	38,0	60,0	90,0	120,0	150,0
10	SFC	0,0	6,0	12,0	24,0	40,0	60,0	85,0	110,0
	SFN	0,0	15,0	30,0	60,0	90,0	120,0	160,0	200,0
11	SFC	0,0	8,0	16,0	38,0	60,0	90,0	120,0	150,0
	SFN	0,0	15,0	30,0	60,0	90,0	120,0	160,0	200,0
12	SFC	0,0	6,0	12,0	24,0	40,0	60,0	85,0	110,0
	SFN	0,0	6,0	12,0	24,0	40,0	60,0	85,0	110,0
13	SFC	0,0	15,0	30,0	60,0	90,0	120,0	160,0	200,0
	SFN	0,0	8,0	16,0	38,0	60,0	90,0	120,0	150,0
14	SFC	0,0	4,0	8,0	16,0	30,0	45,0	60,0	80,0
	SFN	0,0	6,0	12,0	24,0	40,0	60,0	85,0	110,0

## 2.6 Fósforo remanescente (P-rem) nas concentrações 15, 30, 45, 60 e 75 mg L<sup>-1</sup>

Seguiu-se o método proposto por Alvarez V. et al., (2000), com adaptações no tempo de agitação. Em erlenmeyer com capacidade para 125 mL, colocou-se 5 cm<sup>3</sup> de amostras de TFSE e foram adicionados 50 mL de CaCl<sub>2</sub> 10 mmol/L contendo as

concentrações de P 15, 30, 45, 60 e 75 mg L<sup>-1</sup> na forma de KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>. A mistura solo-solução foi agitada por 5 min a 200 RPM. Após 16 h de repouso, coletou-se uma alíquota do sobrenadante (solução de equilíbrio) na qual o P foi dosado por espectrometria de absorção molecular, conforme Braga e Defelipo (1974). Este ensaio contou com duas repetições por amostra.

## **2.7 Concentração de enxofre no extrato de Mehlich-1**

Com o objetivo de se avaliar o desgaste químico do extrator, adicionou-se 100 mL do extrator em 10 cm<sup>3</sup> de TFSE, em Erlenmeyer com capacidade para 125 mL. A mistura solo-extrator foi agitada por 5 min a 200 RPM. Após 16 h de repouso, coletou-se 25 mL do sobrenadante e filtrou-se em papel de filtragem rápida. A concentração de enxofre no extrato de Mehlich-1 das amostras (S-M1) foi determinada por espectrometria de emissão óptica em plasma induzido (ICP-OES). Este ensaio contou com duas repetições por amostra.

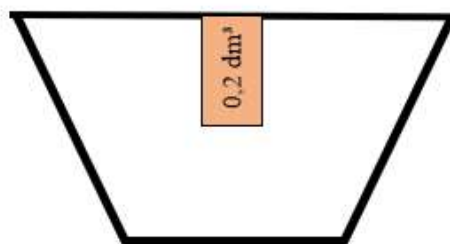
## **2.8 Cultivo de plantas de milho em casa de vegetação**

Foi conduzido um experimento em casa de vegetação do Departamento de Solos da UFV no período de setembro a novembro de 2024. Foram cultivadas plantas de milho (*Zea mays*), híbrido BM 3063, com e sem adubação fosfatada, em amostras das condições de uso cultivadas e não cultivadas de sete solos, selecionados de forma a propiciar ampla variação quanto às características físicas, químicas e quanto ao FCP. Portanto, o desenho experimental foi a combinação do fatorial 2x2x7. As unidades experimentais foram constituídas por vasos plásticos com 2 dm<sup>3</sup> de solo contendo quatro plantas de milho e foram dispostas em delineamento de blocos casualizados com três repetições.

Para os solos que se fez necessário, efetuou-se a calagem estimando-se a necessidade de calagem para elevar a saturação de bases a 70 %. O corretivo utilizado foi uma mistura de carbonatos de cálcio e magnésio, reagentes analíticos, na relação molar Ca:Mg de 4:1 e que foi aplicado em todo o volume de solo em cada unidade experimental. Na sequência, os solos foram umedecidos com água destilada até a capacidade de campo e mantidos em casa de vegetação por 20 d. Durante esse período, quando necessário, os solos foram reumedecidos. Após esse período as amostras foram novamente secas ao ar, passadas em peneira de 2 mm e retornadas para os vasos.

A adubação fosfatada foi aplicada localizadamente em 10 % do volume do solo na parte superior e central dos vasos (Figura 1). Utilizou-se um gabarito cilíndrico de 0,2 dm<sup>3</sup>

para facilitar a operação. A fonte de P utilizada foi o reagente analítico fosfato de cálcio monobásico anidro.



**Figura 1.** Esquema de aplicação da fonte de fósforo na região central das unidades experimentais.

As doses de P (Tabela 5) para os SFC e SFN foram definidas conforme o P-rem dos SFN, segundo Alvarez V. et al., (2000). A semeadura de seis sementes de milho ocorreu no volume do solo fertilizado no mesmo dia da aplicação do fertilizante. Foi feito o desbaste das plântulas sete dias após a emergência, mantendo-se quatro plantas por vaso. Os vasos foram irrigados diariamente, a fim de manter a umidade no nível da capacidade de campo.

A adubação com os demais macros e micronutrientes foi parcelada em cinco aplicações na forma de solução com concentração que possibilitou aplicar por vaso: 300 mg  $\text{dm}^{-3}$  de N, 150 mg  $\text{dm}^{-3}$  de K, 80 mg  $\text{dm}^{-3}$  de S, 0,81 mg  $\text{dm}^{-3}$  de B, 1,33mg  $\text{dm}^{-3}$  de Cu, 1,55 mg  $\text{dm}^{-3}$  de Fe, 3,66 mg  $\text{dm}^{-3}$  de Mn, 4,00 mg  $\text{dm}^{-3}$  de Zn e 0,15 mg  $\text{dm}^{-3}$  de Mo, segundo Novais et al. (1991).

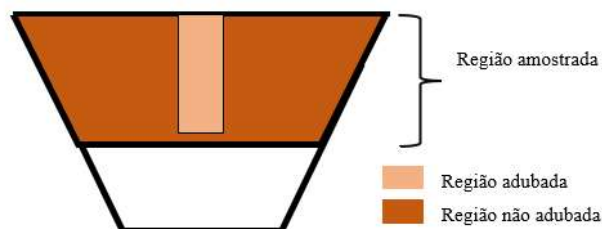
As plantas foram cortadas rente ao solo 40 d após a semeadura, secas em estufa de circulação forçada a 60 °C por 72 h e pesadas para se determinar a produção de matéria seca de parte aérea (mMS\_PA), em g vaso<sup>-1</sup>. Posteriormente, o material seco foi triturado em moinho tipo Wiley, passado em peneira de 1 mm e armazenado em recipientes de plástico até a realização das análises químicas. Para a determinação do teor de P na parte aérea das plantas, foi realizada a digestão nítrico-perclórica (4:1) e dosagem do P por ICP-OES.

Após a colheita das plantas, o solo contido na metade superior dos vasos, contendo a região adubada e parte da não adubada (Figura 2), foi coletado, destorroado obtendo-se uma amostra que foi convertida em TFSA. Nestas amostras de TFSA foi determinado o teor disponível de P pelo extrator Mehlich-1 (tP\_M1), em mg  $\text{dm}^{-3}$ . Também foi determinado, no Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), o teor de P disponível pelo extrator Resina mista (tP\_Resina) em mg  $\text{dm}^{-3}$ ), segundo o método proposto por Raij e Quaggio (2001).

**Tabela 5.** Doses de P definidas para cada solo, independentemente da condição de uso, estabelecida de acordo com o P-rem dos solos de fertilidade natural (SFN), correspondendo ao nível 0,5 das da dose máxima proposta por Alvarez V. et al. (2000).

Solo <sup>(1)</sup>	Condição de uso <sup>(2)</sup>	Doses de P
		mg dm <sup>-3</sup>
1	SFC / SFN	35,0
2	SFC / SFN	41,0
3	SFC / SFN	56,0
4	SFC / SFN	56,0
5	SFC / SFN	48,0
6	SFC / SFN	48,0
7	SFC / SFN	41,0

<sup>(1)</sup> correspondem aos mesmos solos das tabelas 1 e 2; <sup>(2)</sup> SFC: solo de fertilidade construída; SFN: solo de fertilidade natural;



**Figura 2.** Esquema da coleta das amostras de solo na metade superior das unidades experimentais.

De posse dos resultados de  $mMS_{PA}$  e do teor de P no tecido vegetal ( $ttP_{PA}$ ), em  $dag\ kg^{-1}$ , foi calculado o conteúdo de P na parte aérea ( $cP_{PA}$ ), em  $mg\ vaso^{-1}$ . A taxa de recuperação de P pelas plantas ( $tr_{pl}$ ), em %, foi calculada dividindo-se a diferença entre o  $cP_{PA}$  das plantas adubadas e não adubadas pela quantidade de P aplicada por vaso (mg) e multiplicada por 100. O coeficiente de utilização biológica segundo Siddiqi e Glass (1981) foi obtido pelo quociente entre o quadrado da  $mMS_{PA}$  e o  $cP_{PA}$  e expresso em  $g^2\ mg^{-1}$ .

A taxa de recuperação de P pelos extratores Melhich-1 e Resina mista ( $tr_{ex}$ ), em %, foi calculada dividindo-se a diferença entre o teor de P disponível, por cada extrator, em mg

$\text{dm}^{-3}$ , na amostra adubada e não adubada, pela dose de P aplicada por unidade de volume, em  $\text{mg dm}^{-3}$ , e multiplicada por 100.

## 2.9 Análises estatísticas

Foram ajustadas equações de regressão entre as médias de duas repetições dos valores calculados do potencial de fosfato monocálcico (I) em função da quantidade de fósforo adsorvida (q). Os coeficientes das equações foram testados até 10 % de significância. Procedimento semelhante foi adotado ao se plotar os dados do quociente da concentração de P nos extratos (C, em  $\text{mg L}^{-1}$ ) pela quantidade de fósforo adsorvida (x/m, em  $\text{mg g}^{-1}$ ) em função da concentração de P nos extratos (C), ajustando-se assim a forma linear da Isoterma de Langmuir.

Procedeu-se a análise de variância de acordo com o fatorial 2 x 14 (duas condições de uso: SFC e SFN e 14 solos), com duas repetições, para se verificar o efeito de solos e, do desdobramento da condição de uso dentro de solos, para se avaliar o efeito da fertilidade melhorada do solo sobre as variáveis  $I_0$ ,  $q_{\text{MR}}$ ,  $CT_{20}$ ,  $CT_{\text{MR}}$ , CMAP, Energia de Ligação,  $FCP_{\text{máx}}$ , S-M1, P-rem 15, P-rem 30, P-rem 45, P-rem 60 e P-rem 75.

Semelhantemente, procedeu-se a análise de variância de um fatorial 2 x 7 (duas condições de uso: SFC e SFN e sete solos), com três repetições, para se verificar o efeito de solos e, do desdobramento da condição de manejo dentro de solos, com e sem adubação, para se verificar o efeito da construção de fertilidade sobre as variáveis mMS\_PA, cP-PA, tP\_M1 e tP\_Resina

Foi determinado, também, o coeficiente de correlação linear simples (r) entre as variáveis supracitadas dos SFC e SFN e, em alguns casos, agrupando-se ambos os conjuntos, com significância pelo teste “t” testada até 10 %.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Disponibilidade e tamponamento de fósforo em solos de fertilidade natural e construída: indicadores da análise química de rotina

Com base nos valores de fósforo remanescente (P-rem) e na proporção de argila, obtidos a partir das análises químicas e físicas de rotina, foram calculados os níveis críticos de fósforo,  $NC_{\text{P-rem}}$  e  $NC_{\text{argila}}$ , (expressos em  $\text{mg dm}^{-3}$ ), para o extrator Mehlich-1, conforme a

tabela de interpretação de resultados de análises de solos proposta por Alvarez et al. (1999), para os solos de fertilidade natural (SFN) e fertilidade construída (SFC) avaliados neste estudo.

Para tal, ajustaram-se equações de regressão relacionando os níveis críticos discretos de P, definidos por aqueles autores como o limite superior da classe “Médio”, em função do P-rem ( $\text{mg L}^{-1}$ ) e da proporção de argila ( $\text{kg kg}^{-1}$ ). As equações ajustadas apresentaram elevados coeficientes de determinação e são expressas a seguir:

$$\text{NC}_{\text{P-rem}} = 0,0018 \text{ P-rem}^2 + 0,3068 \text{ P-rem} + 4,8848 \quad R^2 = 0,9998$$

$$\text{NC}_{\text{argila}} = 35,749 \text{ argila}^2 - 66,902 \text{ argila} + 39,173 \quad R^2 = 0,9999$$

Adicionalmente, foi calculada a razão entre os teores de fósforo disponível (P), determinados pelo extrator Mehlich-1, nos solos de fertilidade construída e os respectivos solos pareados de fertilidade natural, sendo essa relação expressa como  $\Delta\text{P}$ . Procedimento análogo foi adotado para os valores de fósforo remanescente, resultando no índice  $\Delta\text{P-rem}$ .

Por fim, determinou-se a razão entre o teor de P disponível no solo e o respectivo nível crítico de fósforo, conforme estimado a partir do P-rem e da proporção de argila, originando os índices  $\text{XNC}_{\text{P-rem}}$  e  $\text{XNC}_{\text{argila}}$ , respectivamente. Os resultados obtidos para esses parâmetros encontram-se apresentados na Tabela 6.

Os teores de fósforo disponível determinados pelo extrator Mehlich-1 ( $\text{tp\_M1}$ ) foram, em média, 18,8 vezes superiores nos SFC em comparação aos seus respectivos pares SFN. Destacam-se os solos 2, 3, 7, 9, 11, 12 e 14, que apresentaram valores do índice  $\Delta\text{P}$  superiores a 20, evidenciando que a fertilização fosfatada ao longo dos anos promoveu incremento expressivo na reserva de P desses solos (fator Q).

Ao se ponderar os valores de  $\text{tp\_M1}$  pelos respectivos teores de P-rem e pela proporção de argila, dada a sensibilidade do extrator Mehlich-1 ao FCP, verifica-se que os solos 5, 7, 12 e 14 são aqueles que apresentam as maiores disponibilidades relativas de P, já que os índices  $\text{XNC}_{\text{P-rem}}$  e  $\text{XNC}_{\text{argila}}$  desses solos foram superiores a quatro, indicando que os teores de P extraídos pelo Mehlich-1 são, no mínimo, quatro vezes superiores aos respectivos níveis críticos.

**Tabela 6:** Indicadores da disponibilidade e tamponamento de fosfato em solos de fertilidade natural (SFN) e fertilidade construída (SFC).

Solo	Condição de uso	P	P-rem	Argila	$\Delta P$	$\Delta P$ -rem	$NC_{P\text{-rem}}$	$NC_{\text{argila}}$	$XNC_{P\text{-rem}}$	$XNC_{\text{argila}}$
		mg dm <sup>-3</sup>	mg L <sup>-1</sup>	kg kg <sup>-1</sup>	mg dm <sup>-3</sup>					
1	SFC	50,4	43,4	0,238	8,84	1,14	21,6	25,3	2,34	1,99
	SFN	5,7	38,0	0,164			19,1	29,2	0,30	0,20
2	SFC	27,1	22,6	0,423	20,85	0,94	12,7	17,3	2,13	1,57
	SFN	1,3	24,0	0,342			13,3	20,5	0,10	0,06
3	SFC	14,8	12,3	0,644	24,67	1,13	8,9	10,9	1,66	1,36
	SFN	0,6	10,9	0,754			8,4	9,1	0,07	0,07
4	SFC	32,5	13,5	0,592	12,50	2,25	9,4	12,1	3,47	2,69
	SFN	2,6	6,0	0,607			6,8	11,7	0,38	0,22
5	SFC	47,7	18,9	0,754	7,01	2,61	11,3	9,1	4,21	5,27
	SFN	6,8	7,3	0,751			7,2	9,1	0,94	0,75
6	SFC	63,5	27,0	0,350	9,92	1,33	14,5	20,1	4,39	3,15
	SFN	6,4	20,4	0,216			11,9	26,4	0,54	0,24
7	SFC	197,9	40,8	0,592	58,21	2,34	20,4	12,1	9,70	16,36
	SFN	3,4	17,5	0,619			10,8	11,5	0,32	0,30
8	SFC	26,5	33,3	0,299	9,81	1,70	17,1	22,4	1,55	1,18
	SFN	2,7	19,6	0,316			11,6	21,6	0,23	0,12
9	SFC	21,4	16,7	0,609	23,78	0,95	10,5	11,7	2,04	1,83
	SFN	0,9	17,5	0,623			10,8	11,4	0,08	0,08
10	SFC	16,8	22,2	0,740	14,00	2,52	12,6	9,2	1,34	1,82
	SFN	1,2	8,8	0,577			7,7	12,5	0,16	0,10
11	SFC	39,1	22,2	0,758	27,93	1,67	12,6	9,0	3,11	4,34
	SFN	1,4	13,3	0,693			9,3	10,0	0,15	0,14
12	SFC	66,3	26,7	0,698	30,14	1,07	14,3	9,9	4,62	6,70
	SFN	2,2	24,8	0,620			13,6	11,4	0,16	0,19
13	SFC	12,6	10,1	0,513	3,82	0,65	8,2	14,3	1,54	0,88
	SFN	3,3	15,6	0,382			10,1	18,8	0,33	0,18
14	SFC	114,6	45,0	0,642	12,19	1,62	22,3	11,0	5,14	10,46
	SFN	9,4	27,7	0,696			14,8	9,9	0,64	0,95
<b>Médias</b>	SFC	52,2	25,3	0,561	18,83	1,19	13,4	14,1	3,37	4,26
	SFN	3,4	17,9	0,526	-	-	11,1	15,6	0,31	0,26

P – Fósforo disponível pelo Extrator Mehlich-1; P-rem – Fósforo Remanescente 60 mg L<sup>-1</sup>; Argila – proporção de argila pelo método da pipeta após agitação lenta;  $\Delta P$  - quociente entre os valores de P de SFC e SFN;  $\Delta P$ -rem - quociente entre os valores de P-rem de SFC e SFN;  $NC_{P\text{-rem}}$  e  $NC_{\text{argila}}$  - níveis críticos de P estimados pelo P-rem e proporção de argila, respectivamente, segundo Alvarez et al., (1999).  $XNC_{P\text{-rem}}$  e  $XNC_{\text{argila}}$  - quociente entre os valores de P e os níveis críticos de P estimados pelo P-rem e proporção de argila, respectivamente.

Verificou-se, também, diferenças nos valores de P-rem dos SFC e SFN de um mesmo local. Dos 14 pares avaliados, em 11 os valores desta variável nos SFC foram numericamente

superiores a seus respectivos pares SFN. Comportamento inverso foi verificado somente nos solos 2, 9 e 13. Os valores de  $\Delta P$ -rem, revelam que, na média, os incrementos nos valores de P-rem nos SFC foram de aproximadamente 20%. Destacam-se os solos 4, 5, 7 e 10, cujos incrementos superaram 100%.

Observaram-se diferenças entre os valores estimados de  $NC_{P\text{-rem}}$  e  $NC_{\text{argila}}$  em ambas as condições de uso. Para o grupo dos SFN, essa diferença pode ser explicada pelo fato de que o P-rem é sensível não somente à proporção de argila, mas também à sua mineralogia, o que faz com que as correlações entre P-rem e proporção de argila, e, conseqüentemente, entre  $NC_{P\text{-rem}}$  e  $NC_{\text{argila}}$  não sejam elevadas, conforme destacam Novais e Smith (1999), principalmente em grupos de solos com elevada diversidade, como o do presente estudo.

No grupo SFN, os valores de  $NC_{\text{argila}}$  foram maiores que valores de  $NC_{P\text{-rem}}$ , exceto nos solos 12 e 14. Em contraste, foi encontrada maior frequência de valores de  $NC_{P\text{-rem}}$  maiores que  $NC_{\text{argila}}$  nos SFC (solos 5, 7, 10, 11, 12 e 14), o que pode ser justificado pelo aumento dos valores de P-rem e, conseqüentemente, de  $NC_{P\text{-rem}}$  neste grupo de solos, tendo em vista a relação direta entre essas duas variáveis.

O aumento nos valores de P-rem nos SFC, o que sugere menor tamponamento de fosfato, pode ser decorrente da saturação dos sítios de adsorção de ânions e do acúmulo de P em consequência das adubações fosfatadas ao longo dos anos. Nessa nova situação, esperam-se maiores valores de  $NC_{P\text{-rem}}$ , em decorrência do menor desgaste químico dos extratores sensíveis ao FCP, como o Mehlich-1 (Novais et al., 2015), e das maiores taxas de recuperação de P pelo extrator (Reis, 2020).

Verifica-se, portanto, que o P-rem, diferentemente da proporção de argila, se mostra um indicador sensível não somente às características mineralógicas dos solos, mas também às mudanças na dinâmica do P decorrentes do manejo aplicado. Faz-se importante verificar se os demais indicadores do FCP, como a CMAP, a constante relacionada à energia de ligação, a CTP, o  $FCP_{\text{máx}}$  e, principalmente, os níveis críticos de P obtidos no campo são, a exemplo do P-rem, alterados no processo de construção de fertilidade, o que será discutido nos tópicos seguintes.

### 3.2 Isotermas de adsorção de P, CMAP, “Energia de Ligação” e Fator Capacidade Máximo de P

As equações da forma linear da Isoterma de Langmuir, para uma única região, estão apresentadas na Tabela 7. Com base nas constantes das equações, foram calculados a capacidade máxima de adsorção de fosfato (CMAP, em mg g<sup>-1</sup>), a constante relacionada à energia de ligação (Energia, L mg<sup>-1</sup>) e o Fator Capacidade Máximo (FCP<sub>máx</sub>, L g<sup>-1</sup>), cujos valores estão apresentados na Tabela 8.

**Tabela 7.** Equações da forma Linear de região única da Isoterma de Langmuir de solos de fertilidade natural (SFN) e construída (SFC).

Solo	Manejo			
	SFN		SFC	
	Equação de regressão	R <sup>2</sup>	Equação de regressão	R <sup>2</sup>
1	$\hat{Y} = 36,388 + 4,9564 x^{**}$	0,983	$\hat{Y} = 63,7250 + 5,8404 x^{**}$	0,964
2	$\hat{Y} = 8,4045 + 2,0055 x^{**}$	0,978	$\hat{Y} = 9,3040 + 1,9287 x^{**}$	0,966
3	$\hat{Y} = 1,9670 + 0,6994 x^{**}$	0,982	$\hat{Y} = 4,0467 + 0,7682 x^{**}$	0,980
4	$\hat{Y} = 0,7559 + 0,5968 x^{**}$	0,984	$\hat{Y} = 3,6475 + 0,7939 x^{**}$	0,985
5	$\hat{Y} = 1,1992 + 0,5995 x^{**}$	0,973	$\hat{Y} = 7,2888 + 1,0371 x^{**}$	0,971
6	$\hat{Y} = 9,8944 + 1,5791 x^{**}$	0,977	$\hat{Y} = 13,8852 + 2,3756 x^{**}$	0,975
7	$\hat{Y} = 5,2905 + 1,1441 x^{**}$	0,980	$\hat{Y} = 112,6129 + 1,6395 x^{**}$	0,958
8	$\hat{Y} = 9,9046 + 1,4849 x^{**}$	0,971	$\hat{Y} = 18,8306 + 3,0441 x^{**}$	0,973
9	$\hat{Y} = 3,1775 + 0,9967 x^{**}$	0,972	$\hat{Y} = 4,6042 + 1,0969 x^{**}$	0,970
10	$\hat{Y} = 2,7247 + 0,7456 x^{**}$	0,980	$\hat{Y} = 4,2981 + 1,4177 x^{**}$	0,972
11	$\hat{Y} = 4,9875 + 0,8836 x^{**}$	0,985	$\hat{Y} = 9,6169 + 1,2157 x^{**}$	0,958
12	$\hat{Y} = 3,4908 + 1,4404x^{**}$	0,979	$\hat{Y} = 9,0574 + 1,6399x^{**}$	0,978
13	$\hat{Y} = 3,8033 + 1,3607x^{**}$	0,980	$\hat{Y} = 4,9775 + 0,9842x^{**}$	0,993
14	$\hat{Y} = 8,2169 + 1,4465x^{**}$	0,978	$\hat{Y} = 87,5527 + 2,9611x^{**}$	0,987

$\hat{Y} = C/x/m$ , em g L<sup>-1</sup>;  $x = C$  (concentração de P em equilíbrio em mg L<sup>-1</sup>) \*\*, coeficientes de regressão significativos a 1 %.

As equações evidenciaram variações nos valores do intercepto e do coeficiente angular das retas em função do solo e do manejo adotado. Isso sugere mudanças não apenas na energia de ligação, mas também na CMAP e, por consequência, no FCP<sub>máx</sub>, resultante do produto entre essas variáveis. Em comparação aos respectivos pares SFN, os SFC apresentaram redução significativa da CMAP em 12 dos 14 solos avaliados. Para a constante associada à energia de ligação, observou-se decréscimo em 9 solos; por outro lado, nos solos 10 e 13 houve aumento significativo desse parâmetro. Quanto ao FCP<sub>máx</sub>, verificou-se diminuição significativa em 10 dos 14 solos, sendo que apenas o SFC 13 apresentou valor superior ao do respectivo SFN.

**Tabela 8.** Capacidade Máxima de Adsorção de Fosfato (CMAP), constante relacionada à energia de ligação (Energia), fator capacidade máximo de P (FCP<sub>máx</sub>) de solos de fertilidade natural (SFN) e construída (SFC).

Solo	Manejo					
	SFN			SFC		
	CMAP	Energia	FCP <sub>máx</sub>	CMAP	Energia	FCP <sub>máx</sub>
	mg g <sup>-1</sup>	L mg <sup>-1</sup>	L g <sup>-1</sup>	mg g <sup>-1</sup>	L mg <sup>-1</sup>	L g <sup>-1</sup>
4	1,707	0,604	1,031	1,259 ***	0,218 ***	0,275 ***
5	1,721	0,369	0,635	0,963 ***	0,144 ***	0,139 ***
10	1,341	0,276	0,369	0,705 ***	0,330 *	0,232 ***
3	1,447	0,308	0,445	1,301 ***	0,190 ***	0,248 ***
11	1,131	0,177	0,201	0,822 ***	0,126 *	0,104 ***
13	0,999	0,169	0,169	1,018 ns	0,207 °°	0,209 °°
9	1,018	0,272	0,276	0,911 ***	0,238 °	0,217 **
7	0,875	0,216	0,189	0,618 ***	0,014 ***	0,009 ***
8	0,674	0,150	0,101	0,329 ***	0,162 ns	0,053 *
6	0,633	0,160	0,101	0,421 ***	0,171 ns	0,072 ns
2	0,498	0,238	0,119	0,518 ns	0,207 ns	0,107 ns
12	0,694	0,413	0,286	0,610 ***	0,181 ***	0,110 ***
14	0,691	0,176	0,121	0,343 ***	0,033 ***	0,011 ***
1	0,201	0,136	0,027	0,171 °°	0,092 °°	0,015 ns
<b>Médias</b>	0,973	0,262	0,291	0,713 ***	0,165 ***	0,129 ***
<b>CV (%)</b>	46,6	49,5	92,0	48,7	49,6	72,2
		FS		85,7%	64,3%	71,4%

FS: Frequência de significância a pelo menos 5% pelo teste F. ns, °, °°, \*, \*\*, \*\*\*, diferença entre as condições de fertilidade natural e fertilidade construída não significativa, significativa a 15, 10, 5, 1 e 0,1% pelo teste F. Solos ordenados em ordem crescente do P-rem dos SFN.

O FCP<sub>máx</sub>, proposto por Holford e Mattingly (1976) e obtido pelo produto entre CMAP e energia de ligação, é uma medida da quantidade adsorvida e também da energia envolvida na adsorção (Novais e Smyth, 1999). A redução nos valores desta variável na maioria dos solos de fertilidade construída sugere que nestes solos deve haver menor competição entre as plantas e solo pelo P adicionado.

Os resultados confirmam a já esperada tendência de redução no FCP indicado pelas variáveis indicadoras supracitadas, em função da saturação dos sítios de adsorção de P pelo resíduo das adubações fosfatadas ao longo dos anos de cultivo, o que confirma a hipótese deste trabalho. Berwanger et al. (2008) também verificaram redução na CMAP e na constante relacionada à energia de ligação nas camadas superficiais de solos que receberam P na forma de dejetos de suínos.

Tendência contrastante foi observada nos solos 2, 10 e 13, cujos indicadores do FCP sugeriram aumento no tamponamento nos SFC. No entanto, deve-se pontuar que esses resultados, além de não comporem a tendência majoritária, podem ser atribuídos às diferenças texturais entre os SFC e SFN do mesmo local, embora tenha havido o esforço de coletá-las o mais próximo possível. Outra possibilidade é que o tempo de cultivo e, conseqüentemente, o residual de P acumulado ao longo dos anos, sejam menores, comparativamente, nesses SFC. Espera-se que haja convergência para a tendência majoritária com o passar dos anos de cultivos.

Os trabalhos de Kurtz e Quirk (1965), Bache e Williams (1971), Smyth e Sanchez, (1980), Nurwakera (1991) revelaram pequena ou nula variação na CMAP em função da aplicação prévia de P ou em solos com histórico de cultivos. Novais (1977) também constatou pequena variação na CMAP após promover cultivos sucessivos com o objetivo de exaurir o P de solos cultivados.

De acordo com Novais e Smyth (1999), estes trabalhos fundamentam o modelo proposto por Bache e Williams (1971) e Bolland et al. (1996), segundo o qual não há variações no FCP em função da adição ou exaustão do P dos solos. Portanto, de acordo com o modelo, a CMAP seria constante e a energia de ligação é que variaria com o manejo do solo e que variações no FCP em função de doses de P previamente aplicadas, como no trabalho de Barrow (1974), se devem à utilização de doses de P muito elevadas e muito além das comumente utilizadas na prática.

Tal modelo não se ajustou aos solos do presente estudo, tendo em vista a predominante redução nos valores de CMAP nos SFC. No entanto, assim como verificado pelos autores citados no parágrafo anterior, neste trabalho também foram encontradas alterações significativas na constante relacionada à energia de ligação. Como os SFC são de áreas de produções comerciais e, majoritariamente, de culturas anuais, descarta-se a hipótese de aplicação de doses exageradas de P, o que se confirma pelos valores de P disponível pelo extrator Mehlich-1 que estão acima do nível crítico, mas não em elevada magnitude, exceto nos solos 7 e 14.

O confronto entre o modelo supracitado e os dados observados neste trabalho indica que, embora haja considerável resiliência na CMAP e no  $FCP_{m\acute{a}x}$ , adubações em doses recomendadas ao longo de muitos anos de cultivos podem alterar significativamente o tamponamento dos solos, mesmo daqueles altamente intemperizados e inicialmente pobres em P.

A energia de ligação parece ser menos resiliente e mais sujeita às variações de curto prazo na atividade de P na solução do solo em decorrência dos ciclos de aporte via fertilização e mineralização e retirada de P pelas raízes das plantas, o que pode explicar a seguinte ordem decrescente de frequência de significância observada para os indicadores do FCP ao manejo:  $CMAF > FCP_{m\acute{a}x} > Energia$ .

Cabe pontuar que, conforme os objetivos do trabalho, os resultados observados descrevem a situação momentânea da dinâmica do P nos solos em situação de campo. Por se tratarem de áreas cultivadas comercialmente, presume-se que a constância nos ciclos de aportes via adubação e retirada de nutrientes com as colheitas confira certa estabilidade a estes resultados.

Rheinheimer et al. (2003) recomendam que seja considerado o residual de P no ajuste das isotermas para evitar subestimação da energia de ligação. No entanto, os autores verificaram pouco efeito deste artifício nas estimativas da CMAF. Esta estratégia não foi adotada neste trabalho, uma vez que se presumiu, em virtude dos frequentes aportes de P nestes solos em situação de campo, que o acúmulo de P nestes solos seja constante. Sugere-se, no entanto, mais estudos para verificar a estabilidade das alterações verificadas, o que poderia ser feito pela avaliação destes mesmos índices do FCP após a exaustão, com ferramentas químicas ou biológicas, do P-lábil dos SFC.

Apesar da redução nos índices de FCP, os SFC mais tamponados apresentam, ainda, elevados valores destes mesmos índices o que pode indicar a necessidade de conhecê-los para bem manejar a adubação fosfatada nestes solos.

### **3.3 Potencial de Fósforo (I) e Capacidade Tampão de Fósforo (CTP)**

#### **3.3.1 Equações do Potencial de Fósforo (I) em função do P adsorvido**

Os dados do potencial de fósforo ( $0,5 \text{ pCa} + \text{pH}_2\text{PO}_4$ ) em função da quantidade de P adsorvida (q), se ajustaram, predominantemente, ao modelo quadrático, com exceção dos SFC 7 e 14 (Tabela 9).

A relação curvilínea, também encontrada por Barrow et al. (1965), Jensen (1970), Novais (1977) e em solos do Cerrado brasileiro por Bahia Filho (1975), indica que a CTP não é constante nestes solos e, portanto, dependente do valor de I no ponto onde se determina a tangente.

**Tabela 9.** Equações de regressão para a variação do potencial de fosfato (0,5 pCa + pH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>) em função da quantidade de P adsorvida (q) em amostras de solos de fertilidade natural (SFN) e construída (SFC).

Solo	Manejo			
	SFN		SFC	
	Equação	R <sup>2</sup>	Equação	R <sup>2</sup>
1	$\hat{Y} = 6,76 - 0,0162^{**} x + 3,21 \cdot 10^{-5} x^2$	0,994	$\hat{Y} = 6,64 - 0,0249^{**} x + 8,80 \cdot 10^{-5} x^2$	0,994
2	$\hat{Y} = 8,18 - 0,0161^* x + 2,17 \cdot 10^{-5} x^2$	0,972	$\hat{Y} = 8,02 - 0,0134^* x + 1,64 \cdot 10^{-5} x^2$	0,972
3	$\hat{Y} = 7,67 - 0,0038^* x + 1,59 \cdot 10^{-6} x^2$	0,996	$\hat{Y} = 7,75 - 0,0053^* x + 2,85 \cdot 10^{-6} x^2$	0,996
4	$\hat{Y} = 7,86 - 0,0038^* x + 1,70 \cdot 10^{-6} x^2$	0,995	$\hat{Y} = 7,53 - 0,0053^{**} x + 3,12 \cdot 10^{-6} x^2$	0,995
5	$\hat{Y} = 8,22 - 0,0059^* x + 3,39 \cdot 10^{-6} x^2$	0,962	$\hat{Y} = 7,34 - 0,0062^{**} x + 4,61 \cdot 10^{-6} x^2$	0,962
6	$\hat{Y} = 7,87 - 0,0109^* x + 1,02 \cdot 10^{-5} x^2$	0,988	$\hat{Y} = 7,48 - 0,0108^{**} x + 1,22 \cdot 10^{-5} x^2$	0,988
7	$\hat{Y} = 7,33 - 0,0063^{**} x + 1,02 \cdot 10^{-6} x^2$	0,990	$\hat{Y} = 5,20 - 0,0029^{**} x$	0,985
8	$\hat{Y} = 7,47 - 0,0087^{**} x + 7,70 \cdot 10^{-6} x^2$	0,990	$\hat{Y} = 7,41 - 0,0147^{**} x + 2,13 \cdot 10^{-5} x^2$	0,990
9	$\hat{Y} = 7,80 - 0,0080^* x + 6,43 \cdot 10^{-6} x^2$	0,983	$\hat{Y} = 8,10 - 0,0088^{**} x + 7,17 \cdot 10^{-6} x^2$	0,983
10	$\hat{Y} = 7,68 - 0,0052^* x + 2,89 \cdot 10^{-6} x^2$	0,980	$\hat{Y} = 7,81 - 0,01115^{**} x + 1,37 \cdot 10^{-5} x^2$	0,980
11	$\hat{Y} = 7,35 - 0,0047^{**} x + 2,46 \cdot 10^{-6} x^2$	0,997	$\hat{Y} = 7,56 - 0,0095^* x + 9,28 \cdot 10^{-6} x^2$	0,997
12	$\hat{Y} = 8,04 - 0,0129^* x + 1,55 \cdot 10^{-5} x^2$	0,979	$\hat{Y} = 6,79 - 0,0061^{**} x + 5,70 \cdot 10^{-6} x^2$	0,979
13	$\hat{Y} = 7,96 - 0,0088^{**} x + 7,05 \cdot 10^{-6} x^2$	0,988	$\hat{Y} = 7,41 - 0,0035^* x + 1,21 \cdot 10^{-5} x^2$	0,988
14	$\hat{Y} = 6,94 - 0,0070^{**} x + 6,99 \cdot 10^{-6} x^2$	0,995	$\hat{Y} = 5,54 - 0,0070^{**} x$	0,995

$\hat{Y}$ : potencial de fosfato (0,5 pCa + pH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>); x: quantidade de fósforo adsorvida (q) em mol de P 10<sup>-8</sup> g<sup>-1</sup>. Equações ajustadas com os dados transformados. Para se determinar  $\hat{Y}$  quando x for igual a 20 mol de P 10<sup>-8</sup> g<sup>-1</sup>, deve-se considerar x = 20 na equação. \*, \*\*: coeficientes significativos a 5 e 1 % de probabilidade, respectivamente.

Segundo Novais e Smyth (1999), a natureza do relacionamento entre I e q é dependente da amplitude das concentrações de P adotadas no ensaio. Portanto, há uma maior possibilidade de se ter relacionamento linear em solos altamente intemperizados e com maior FCP caso sejam adotadas, no ensaio laboratorial, concentrações de P com amplitude mais estreita, como usualmente se faz para estudos com solos de climas temperados, uma vez que são necessárias maiores concentrações de P para se atingir uma segunda região de adsorção de fosfato.

No presente trabalho, as concentrações de P adotadas foram previamente definidas de acordo com um indicador do FCP, que foi o fósforo remanescente (P-rem). As maiores concentrações variaram de 12 mg L<sup>-1</sup>, nos solos menos tamponados, a 30 mg L<sup>-1</sup> nos solos mais tamponados. O ajuste curvilíneo em 26 das 28 amostras estudadas indica que as doses foram suficientes para se alcançar pelo menos duas regiões com diferentes valores de energia de adsorção de P.

O predomínio do ajuste curvilíneo também foi encontrado no trabalho de Bahia Filho (1975), onde as concentrações de P adotadas variaram de 0 a 60 mg L<sup>-1</sup> para todos os 20 solos e o autor encontrou ajuste linear em apenas três amostras, que apresentaram baixa disponibilidade inicial de P pelo extrator Mehlich-1 e com valores contrastantes de FCP.

Os SFC 7 e 14 foram os únicos que se ajustaram ao modelo linear, o que pode ser devido à elevada disponibilidade de P em ambos, já que os teores de P disponível pelo extrator Mehlich-1 são 197,9 e 114,6 mg dm<sup>-3</sup>, respectivamente. Esses solos também se destacam pelo menor valor do intercepto da equação ( $I_0$ ), ambos menores que 5, o que indica elevada atividade de P na solução do solo.

Para os solos que apresentam elevado fator quantidade (Q), e com base nas conclusões de Muljaldi et al. (1966) acerca da existência de diferentes regiões de energia de adsorção de fósforo (P), infere-se que o efeito residual das adubações fosfatadas promoveu a saturação dos sítios de adsorção de maior energia. Assim, o ajuste linear observado não decorre, provavelmente, de concentrações insuficientes de P no ensaio para atingir uma segunda região de adsorção, mas sim do fato de que permaneceram predominantemente sítios pertencentes à segunda região, caracterizados por energias de ligação mais homogêneas e relativamente inferiores.

O ajuste não linear entre I e q nos outros 12 SFC, o que implica na existência de duas regiões distintas de adsorção nestes solos, é um indicativo de que o residual da adubação fosfatada não foi suficiente para saturar os sítios de adsorção da primeira região. A julgar pelos resultados dos SFC 7 e 14, espera-se que com a contínua adubação fosfatada nestes solos possa-se, futuramente, encontrar o ajuste linear, principalmente nas amostras menos tamponadas.

### **3.3.2 Fator Intensidade ( $I_0$ ) e valor de q no ponto de “mudança de região” ( $q_{MR}$ ) na curva $I=f(q)$**

O fator Intensidade,  $I_0$  (potencial de fosfato monocálcico no solo, 0,5 pCa + pH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>), reduziu significativamente nos SFC 7, 12 e 14 (Tabela 10). Os valores de  $I_0$  variaram de 6,76 a 8,22 com média de 7,65 nos SFN. Para o grupo SFC, variaram de 5,21 a 8,39 com média de 7,25. Apesar da diferença significativa entre as médias de  $I_0$  dos SFC e SFN, a magnitude dos valores indica que a atividade do P permanece baixa mesmo nos solos de fertilidade construída, exceto nos solos 7, 12 e 14 que se destacam pela disponibilidade de P acima da média dos demais SFC.

Esse fato pode ser explicado por dois fatores. O primeiro se refere à transformação dos valores de atividade de P em uma escala logarítmica, o que gera um tamponamento matemático e reduz a variabilidade dos dados. O segundo diz respeito ao FCP, que tende a manter constante a atividade de P na solução do solo, mesmo quando ocorre a fertilização com este nutriente. A não ocorrência de variação significativa de  $I_0$  nos SFC em relação ao

respectivo SFN na maioria dos pares de solos analisados é um indicativo que o FCP ainda é um moderador da atividade de P em SFC.

**Tabela 10.** Fator intensidade ( $I_0$ ) e P adsorvido no ponto de mudança de região da curva ( $q_{MR}$ ) que descreve a variação do fator intensidade (I) em relação a ao P adsorvido (q) nos em amostras de solos de fertilidade natural (SFN) e construída (SFC).

Solo	SFN		SFC	
	$I_0$ 0,5 pCa + p $H_2PO_4$	$q_{MR}$ mol de P $10^{-8} g^{-1}$	$I_0$ 0,5 pCa + p $H_2PO_4$	$q_{MR}$ mol de P $10^{-8} g^{-1}$
4	7,86	352,8	7,52 <sup>ns</sup>	192,9 <sup>***</sup>
5	8,22	226,9	7,34 <sup>ns</sup>	172,2 <sup>*</sup>
10	7,68	223,9	7,80 <sup>ns</sup>	129,6 <sup>***</sup>
3	7,57	336,4	7,74 <sup>ns</sup>	230,7 <sup>***</sup>
11	7,35	338,9	7,56 <sup>ns</sup>	91,9 <sup>***</sup>
13	7,96	189,9	8,39 <sup>ns</sup>	201,0 <sup>ns</sup>
9	7,85	187,9	8,10 <sup>ns</sup>	167,3 <sup>ns</sup>
7	7,37	179,6	5,21 <sup>***</sup>	-
8	7,47	164,6	7,38 <sup>ns</sup>	116,5 <sup>oo</sup>
6	7,86	162,4	7,47 <sup>ns</sup>	121,1 <sup>oo</sup>
2	8,18	116,9	8,02 <sup>ns</sup>	120,2 <sup>ns</sup>
12	8,04	160,4	6,77 <sup>***</sup>	137,4 <sup>ns</sup>
14	6,93	123,3	5,54 <sup>***</sup>	-
1	6,76	87,8	6,64 <sup>ns</sup>	48,4 <sup>o</sup>
<b>Médias</b>	7,65	203,7	7,25 <sup>***</sup>	144,1 <sup>***</sup>
<b>FS (%)</b>			57,1	35,7

FS: Frequência de significância a 5% pelo teste F. <sup>ns</sup>, <sup>oo</sup>, <sup>o</sup>, <sup>\*</sup>, <sup>\*\*</sup>, <sup>\*\*\*</sup>, diferença entre as condições de fertilidade natural e fertilidade construída não significativa ou significativa a 15, 10, 5, 1 e 0,1%, respectivamente, pelo teste F. Para a variável  $I_0$ , procedeu-se a análise estatística com os valores de atividade de  $Ca^{2+}$  e  $H_2PO_4^-$  antes da transformação logarítmica. Solos ordenados em ordem crescente do P-rem dos SFN.

Apesar da baixa atividade de P na solução, o crescimento das plantas não deve ser limitado por P nos SFC, em virtude da reposição deste nutriente pelo Fator Quantidade (Q), uma vez que apresentam a disponibilidade de P nas classes Boa e Muito Boa (Tabela 2).

Os resultados corroboram aqueles encontrados por Bahia Filho (1975), que encontrou valores de  $I_0$  superiores a 7,0 em amostras de solos do Bioma Cerrado com baixa disponibilidade de P. Novais (1977), em trabalho com amostras com boa disponibilidade inicial de P, também encontrou valores de potencial superiores a 7,0 e que aumentaram levemente após nove cultivos sucessivos.

Somente os SFC 7 e 14 apresentaram redução nos valores de  $I_0$  superior a uma unidade de potencial. Como mencionado no item anterior, estes solos apresentam elevada disponibilidade de P. Postula-se, para essas amostras, a hipótese de que, com a elevada oferta de P, há saturação dos sítios de adsorção o que faz com que o P adicionado permaneça na solução do solo.

Destaca-se que os SFN 7 e 14 não são os menos tamponados, o que os tornariam mais propensos à maiores alterações no  $I_0$  à medida que fossem cultivados. Como seus respectivos pares de fertilidade construída apresentaram as maiores reduções nos valores de  $I_0$ , o que indica aumento na atividade de P na solução do solo, pode-se inferir, portanto, que a as doses de P recebidas por esses solos, ao longo dos anos de cultivo, foram maiores.

O fator intensidade, medido pelo potencial de fosfato no solo ( $I_0$ ), apresentou correlações moderadas e positivas com a CMAP, Energia,  $FCP_{m\acute{a}x}$  e negativa com o P-rem nos SFN. Já nos SFC, essas mesmas variáveis mantiveram o mesmo comportamento quanto ao  $I_0$ . No entanto, os coeficientes e as significâncias foram maiores, evidenciando maior dependência do  $I_0$  ao FCP em solos com histórico de cultivos (Tabela 11).

Esses resultados sugerem que, em solos sem histórico de cultivos e com baixa disponibilidade de P, há a tendência que a atividade de P na solução do solo seja pequena independentemente do grau de tamponamento. Na medida em que os solos são cultivados, com o aumento da disponibilidade de P, tende-se a aumentar  $I_0$ , majoritariamente nos solos com menor FCP. Os SFC tendem a conservar, pelo menos em parte, seu tamponamento, o que explica maior dependência de  $I_0$  ao FCP em solos cultivados.

**Tabela 11.** Coeficientes de correlação linear simples entre o Potencial de fosfato no solo ( $I_0$ ) e indicadores do FCP em solos de fertilidade natural (SFN) e construída (SFC).

	CMAP	Energia	$FCP_{m\acute{a}x}$	P-rem	Argila
$I_0$	0,41 °	0,49 *	0,40 °	-0,54 **	0,12 <sup>ns</sup>
$I_0$	0,47 *	0,83 ***	0,72 **	-0,85 ***	-0,02 <sup>ns</sup>

Capacidade Máxima de Adsorção de Fosfato (CMAP); constante relacionada à energia de ligação (Energia); Fator capacidade máximo de P ( $FCP_{m\acute{a}x}$ ). <sup>ns</sup>, °, \*, \*\*, \*\*\*, não significativo, significativo a 10, 5, 1 e 0,1%

Conforme definido anteriormente o  $q_{MR}$  corresponde ao ponto, na curva de relacionamento entre  $I_0$  e  $q$ , que define uma mudança na tendência da inclinação, distinguindo duas regiões de diferentes energias de ligação na adsorção P. Neste trabalho, definiu-se o  $q_{MR}$  pelo eixo das abcissas e, portanto, a unidade do  $q_{MR}$  é mol de P  $10^{-8} g^{-1}$ . Interpreta-

se este valor como sendo a quantidade de P adsorvida por grama de solo necessária para se alcançar a segunda região de adsorção de P.

Os valores mínimos e máximos de  $q_{MR}$  variaram de 87,85 a 352,8 mol de P  $10^{-8} g^{-1}$  nos SFN e 48,35 a 230,7 mol de P  $10^{-8} g^{-1}$  nos SFC. As médias para os respectivos grupos foram 203,7 e 144,1 mol de P  $10^{-8} g^{-1}$  e diferiram estatisticamente entre si.

Foi observado que os solos com menores valores de P-rem e, portanto, mais tamponados apresentaram os maiores valores de  $q_{MR}$ , independentemente da condição de uso. Também foi observado que os SFC mais tamponados apresentaram redução significativa no valor de  $q_{MR}$  quando comparados a seus respectivos pares SFN.

A redução nos valores do  $q_{MR}$  nos SFC indica que o efeito acumulado das fertilizações ao longo dos anos de cultivo saturou parte dos sítios da primeira região, principalmente nos solos mais tamponados, o que faz com que as adubações futuras tendam a apresentar maior eficiência, devido ao menor potencial de competição com o solo. Ainda assim, a magnitude dos valores de  $q_{MR}$  nos solos SFC mais tamponados indica a necessidade de maiores doses de P para se alcançar regiões de menor energia de adsorção nesses solos, o que sugere, mais uma vez, resiliência no FCP dos solos.

Não foi possível determinar o  $q_{MR}$  dos SFC 7 e 14, já que a variação de I em relação a q ajustou-se à regressão linear, o que indica adsorção de P em sítios de mesma afinidade. Isso pode se dever ao fato desses solos apresentarem elevado teor de P disponível e, conseqüentemente, os sítios de maior afinidade já se encontrarem saturados.

Os resultados encontrados vão ao encontro daqueles observados por Alvarez V. e Fonseca (1990), que almejavam, por meio da isoterma de Langmuir, identificar, para solos brasileiros, as três regiões de adsorção de P proposta por Muljaldi et al. (1966). Os autores concluíram que são necessárias maiores doses de P para se alcançar a região III de adsorção nos solos mais tamponados.

### 3.3.3 Capacidade Tampão no $q_{MR}$ (CT<sub>MR</sub>) e em 20 mol de P $10^{-8} g^{-1}$ (CT<sub>20</sub>)

As equações ajustadas entre o potencial de fosfato monocálcico (I) e a quantidade de P adsorvida (q) demonstraram predomínio do modelo quadrático (Tabela 9), o que indica que a capacidade tampão de fosfato (CTP, Q/I) não é constante ao longo da curva de adsorção de P e seu valor diferencial é dependente da região da curva onde se determina dq/dI.

Neste trabalho, foram calculados dois valores diferenciais de CTP, um no ponto de tangência  $Q = 20 \cdot 10^{-8}$  mol de P  $g^{-1}$  (CT<sub>20</sub>), como proposto por (Jensen,1970) e outro no

ponto de mudança de região (CT\_MR). Os valores para essas duas variáveis, expressos em mol de P  $10^{-8}$  g<sup>-1</sup> de solo unidade de potencial<sup>-1</sup>, para os diferentes solos e manejos são apresentados na Tabela 12. Destaca-se que, os SFC 7 e 14, por apresentarem relacionamento linear entre I e q, possuem CTP constante e, portanto, os valores CT\_MR e CT\_20 são iguais.

Os valores de CT\_MR foram maiores que os de CT\_20 independentemente do solo ou do manejo, o que pode ser explicado pelo fato de que o ponto de tangência para o cálculo da CT\_MR é sempre maior que  $20 \cdot 10^{-8}$  mol de P g<sup>-1</sup> (Tabela 6), onde se calcula a CT\_20. Como se admitiu que o q\_MR é o divisor entre as duas regiões e, como  $q_{MR} > 20 \cdot 10^{-8}$  mol de P g<sup>-1</sup>, infere-se que a CT\_20 foi calculada na primeira região para todos os solos que apresentaram relacionamento curvilíneo entre I e q.

Novais e Smyth (1999) sugerem que, para modelos curvilíneos de ajustamento, a CTP seja calculada em pontos de tangência na primeira região, já que apresenta forte linearidade e, portanto, os valores de CTP são mais constantes e característicos de cada solo.

Os valores da CT\_MR foram sempre maiores que os valores da CT\_20, embora essa diferença não tenha sido testada estatisticamente. Isso se deve ao fato de que, neste estudo, os valores q\_MR, ponto de cálculo da CT\_MR, superaram  $20 \cdot 10^{-8}$  mol de P g<sup>-1</sup>, ponto de cálculo da CT\_20. Como a CTP aumenta ao longo da curva do relacionamento entre I e q, maiores valores de q implicam em maiores valores de CTP. Apesar da diferença numérica, as duas maneiras de se calcular a CTP apresentaram semelhantes sensibilidades às mudanças no tamponamento decorrentes do cultivo dos solos ao longo dos anos.

Como esperado, nos SFN, foram observados maiores valores de CT\_MR e CT\_20 nos solos com menores valores de P-rem e mais argilosos. Esse comportamento também foi verificado nos SFC, embora de maneira mais difusa, o que indica que o cultivo dos solos pode diminuir a correlação entre diferentes indicadores do FCP, como P-rem, teor de argila, CT\_MR e CT\_20,

Bahia Filho (1975) também encontrou maiores valores de CTP nos solos mais argilosos do Cerrado. No entanto, a magnitude dos valores de CTP diferiram consideravelmente do presente trabalho, o que pode ser explicado por diferenças nas concentrações de P utilizadas nos diferentes trabalhos.

O efeito do manejo sobre a CTP (CT\_MR e CT\_20) foi significativo em 8 dos 14 pares de solos. Em 5 solos, houve redução significativa da CTP de SFC quando comparada ao seu respectivo par SFN. Em outros 3, a CTP foi maior no SFC do que no SFN. A redução média foi de aproximadamente 24 % em ambas as variáveis, que mostram semelhante comportamento e sensibilidade às alterações no FCP em função da condição de uso.

**Tabela 12.** Capacidade Tampão de Fosfato no Ponto de mudança de região (CT\_MR) e em 20 mol de P  $10^{-8}$  g<sup>-1</sup> (CT\_20) em solos de fertilidade natural (SFN) e construída (SFC).

Solo	SFN		SFC	
	CT_MR	CT_20	CT_MR	CT_20
	mol de P $10^{-8}$ g <sup>-1</sup> de solo unidade de potencial <sup>-1</sup>			
4	315,4	268,5	218,3 ***	197,8 ***
5	195,0	171,5	186,8 ns	165,1 ns
10	222,1	196,4	146,8 ***	90,6 ***
3	306,7	266,1	215,7 ***	191,0 ***
11	260,2	215,4	115,9 ***	107,6 ***
13	139,1	120,4	154,1 ns	136,9 ns
9	136,1	118,4	134,5 ns	115,8 ns
7	175,8	151,8	339,1 ***	339,1 ***
8	134,6	117,0	83,5 **	71,6 **
6	108,2	93,5	108,0 ns	95,3 ns
2	73,8	63,9	87,5 ns	76,5 ns
12	96,0	79,5	193,6 ***	173,0 ***
14	164,3	145,9	206,2 *	206,2 ***
1	74,8	64,3	48,3 °	43,2 °
<b>Médias<sup>(1)</sup></b>	178,8	154,2	136,3 **	117,4 **
	FS		57,1%	57,1%

FS: Frequência de significância a pelo menos 5% pelo teste F. ns, °°, °, \*, \*\*, \*\*\*, diferença entre as condições fertilidade natural e fertilidade construída não significativa, significativa a 15, 10, 5, 1 e 0,1% pelo teste F. Solos estão em ordem crescente do P-rem dos SFN. <sup>(1)</sup> médias excluindo-se os solos 7, 12 e 14, que, contrariamente ao esperado, apresentaram CTP significativamente superior nos SFC.

Cabe ressaltar que, os SFC 7, 12 e 14 apresentaram valores de CT\_MR e CT\_20 significativamente maiores que seus respectivos pares SFN, o que sugere aumento do tamponamento de fosfato com o cultivo dos solos. No entanto, tal comportamento está em desacordo com a expectativa, já que estes SFC são aqueles que apresentaram as maiores disponibilidades de P por Mehlich-1. Adicionalmente, no tópico anterior, os demais indicadores do FCP, como a CMAP, a constante relacionada à energia de ligação e FCP<sub>máx</sub> demonstraram redução no tamponamento de fosfato desses mesmos solos.

Essa divergência de comportamento da CT\_MR e CT\_20 em relação à CMAP, energia e FCP<sub>máx</sub> pode ser devida à forma matemática de se expressar I. Enquanto nas formas hiperbólicas das isotermas de adsorção de P, onde se calcula CMAP, energia e FCP<sub>máx</sub>, o fator intensidade é expresso pela concentração de P, para o cálculo da CT\_MR e CT\_20 a atividade de P é transformada em potencial.

Esse fato fortalece a hipótese de que, para o cálculo do tamponamento (Q/I) em SFC, seja mais adequado a expressão do Fator Intensidade por meio da concentração de P, como nas isotermas, em detrimento da transformação desta variável em potencial, como na obtenção de CT\_MR e CT\_20. Para testar esta hipótese, os mesmos dados experimentais dos solos 7, 12 e 14, em ambas condições de uso, foram utilizados no ajuste de equações de regressão (tabela 13) entre a atividade de P, representada pela sigla (P), e a quantidade de fósforo adsorvido (q).

**Tabela 13.** Equações de regressão para a variação da atividade de P ( $\hat{Y}$ ) em função da quantidade de P adsorvida (x) em solos de fertilidade natural (SFN) e construída (SFC).

SOLO	SFN		SFC	
	Equações	R <sup>2</sup>	Equações	R <sup>2</sup>
7	$\hat{Y} = 3,0280 - 0,0266^{ns} x + 0,0002^{***} x^2$	0,99	$\hat{Y} = 86,2841 - 0,7132^{***} x + 0,0014^{***} x^2$	0,99
12	$\hat{Y} = 2,7293 - 0,0573^* x + 0,0005^{***} x^2$	0,99	$\hat{Y} = 2,9514 - 0,0016^{ns} x + 0,0005^{***} x^2$	0,99
14	$\hat{Y} = 2,4461 - 0,0009^{ns} x + 0,0004^{***} x^2$	0,99	$\hat{Y} = 40,4058 - 0,5302^{***} x + 0,0033^{***} x^2$	0,99

$\hat{Y}$ : atividade de P (P) em  $\mu\text{mol L}^{-1}$ ; x: quantidade de fósforo adsorvida (q) em mol de P  $10^{-8} \text{ g}^{-1}$ . Equações ajustadas com os dados transformados. Para se determinar  $\hat{Y}$  quando X for igual a 200 mol de P  $10^{-8} \text{ g}^{-1}$ , deve-se considerar o valor de x = 200 na equação. <sup>ns</sup>, \*, \*\*\*: coeficientes não significativos, e significativos a 5 e 0,1 % de probabilidade.

De posse das equações, determinou-se a atividade de P do solo (P)<sub>0</sub>, sendo esta definida como valor de atividade de P, em  $\mu\text{mol L}^{-1}$ , quando q = 0. Também foram determinados o ponto de mudança de região (q\_MR), expresso em mol de P  $10^{-8} \text{ g}^{-1}$  e a CTP dos solos, expressas em mol de P  $10^{-8} \text{ g}^{-1} / \mu\text{mol L}^{-1}$ , nos pontos de tangência q = 200  $10^{-8} \text{ mol de P g}^{-1}$  (CT\_200) e no ponto de mudança de região (CT\_MR). Destaca-se que, não foi possível calcular a CTP nos pontos de tangência q = 20  $10^{-8} \text{ mol de P g}^{-1}$  (CT\_20) e por isso adotou-se, arbitrariamente, o ponto q = 200  $10^{-8} \text{ mol de P g}^{-1}$  para o cálculo da CT\_200. Os dados para estas variáveis estão apresentados na tabela 14.

Verificou-se, nesta fórmula alternativa de cálculo, que os SFC quando comparados aos seus respectivos pares SFN, apresentaram, significativamente, maiores atividades de P na solução de solo, menores valores de q\_MR e, principalmente, menores valores de CT\_MR e CT\_200, o que vai ao encontro da hipótese deste trabalho e aos resultados obtidos nos demais indicadores do FCP para estes mesmos solos e confirma a hipótese de que a transformação da concentração de P em potencial de fosfato pode não ser adequada para a análise da CTP em solos de fertilidade construída.

**Tabela 14.** Atividade de P do solo ( $P_0$ ), ponto de mudança de região ( $q_{MR}$ ), Capacidade Tampão de Fosfato no  $q_{MR}$  ( $CT_{MR}$ ) e em 200 mol de P  $10^{-8} g^{-1}$  ( $CT_{200}$ ) em solos de fertilidade natural (SFN) e construída (SFC).

Solo	SFN				SFC			
	( $P_0$ )	$q_{MR}$	$CT_{MR}$	$CT_{200}$	( $P_0$ )	$q_{MR}$	$CT_{MR}$	$CT_{200}$
	$\mu mol L^{-1}$	mol de P $10^{-8} g^{-1}$	mol de P $10^{-8} g^{-1} / \mu mol L^{-1}$		$\mu mol L^{-1}$	mol de P $10^{-8} g^{-1}$	mol de P $10^{-8} g^{-1} / \mu mol L^{-1}$	
7	3,0	364,3	16,1	44,5	86,3 ***	29,5 ***	1,3 ***	1,0 ***
12	2,8	234,6	16,5	24,8	4,0 <sup>ns</sup>	200,6 <sup>ns</sup>	11,3 °	11,4 °
14	2,5	239,9	9,2	11,0	40,4 ***	51,7 ***	1,4 *	0,8 °
<b>Médias</b>	2,8	279,6	13,9	26,7	43,6 ***	93,9 ***	4,7 ***	4,4 **

<sup>ns</sup>, °, \*, \*\*, \*\*\*, diferença entre as condições fertilidade natural e fertilidade construída não significativa, significativa a 10, 5, 1 e 0,1% pelo teste F.

### 3.4 Fósforo remanescente (P-rem) nas concentrações de equilíbrio de 15, 30, 45, 60 e 75 mg L<sup>-1</sup>

Os valores da concentração de P na solução de equilíbrio (P-rem) para as concentrações iniciais de P de 15, 30, 45, 60 e 75 mg L<sup>-1</sup> estão apresentados na tabela 15. Foi verificada uma forte tendência de aumento nos valores do P-rem, em todas as concentrações, nos SFC em comparação aos respectivos pares SFN, com incremento médio de 53,6, 40,3, 38,5, 31,3 e 30,0 % para as concentrações de 15, 30, 45, 60 e 75 mg L<sup>-1</sup>, respectivamente.

Os valores de P-rem na concentração 60 mg L<sup>-1</sup> (P-rem 60), que é a adotada majoritariamente nos laboratórios de rotina de análises química de amostras de solo, aumentaram significativamente em 10 dos 14 pares de solos. Os SFN 13, 2 e 12 foram os únicos que apresentaram valores de P-rem 60 numericamente maiores que seus respectivos pares SFC. Para o solo 13, essa variação foi estatisticamente significativa.

O menor valor de P-rem 60 do SFC 13 em relação ao seu par SFN se justifica, já que esse solo apresentou tendência, ainda que não significativa, de aumento no tamponamento pelos demais indicadores do FCP, como  $CT_{MR}$ ,  $CT_{20}$ , CMAP, Energia e  $FCP_{máx}$ , o que comprova a sensibilidade do P-rem às diferentes situações de tamponamento do solo.

Apesar da redução porcentual nos incrementos no P-rem com o aumento da concentração de P adotada, observou-se a mesma frequência de significância estatística (78,6 %) para as concentrações 15, 30, 45 e 60 mg L<sup>-1</sup>. Por sua vez, a concentração de 75 mg L<sup>-1</sup>, apresentou frequência de 85,7 %, em função da ocorrência de frequência significativa também no solo 12, o que não aconteceu com as demais concentrações.

**Tabela 15.** Concentração de fósforo remanescente (P-rem) na solução de equilíbrio de em solos de fertilidade natural (SFN) e construída (SFC) após a adição de solução contendo 15, 30, 45, 60 e 75 mg L<sup>-1</sup> de P.

SOLO	SFN					SFC				
	15	30	45	60	75	15	30	45	60	75
	mg L <sup>-1</sup>									
4	0,8	3,3	5,7	8,9	14,1	1,9 ***	5,7 ***	10,9 ***	16,1 ***	23,9 ***
5	1,2	3,3	6,9	10,1	16,1	2,8 ***	8,0 ***	14,5 ***	21,8 ***	31,1 ***
10	1,1	3,9	7,0	12,2	17,5	3,5 ***	9,4 ***	16,4 ***	25,2 ***	33,6 ***
3	1,4	3,9	7,2	12,5	18,6	1,4 ns	4,8 *	9,2 **	15,3 **	22,8 ***
11	1,9	7,4	11,9	17,4	25,2	3,1 ***	9,4 ***	16,7 ***	24,9 ***	33,0 ***
13	1,4	5,6	11,7	19,1	24,6	0,9 *	4,0 ***	6,6 ***	13,6 ***	19,1 ***
9	2,5	6,2	11,5	19,5	25,1	2,7 ns	6,4 ns	11,3 ns	19,7 ns	26,2 ns
7	2,6	8,0	13,9	20,8	29,1	9,7 ***	19,5 ***	31,2 ***	42,8 ***	54,9 ***
8	3,9	8,5	15,3	23,9	32,1	5,1 ***	14,2 ***	24,8 ***	35,0 ***	46,7 ***
6	2,7	8,2	14,9	24,3	32,2	3,9 ***	10,3 ***	18,6 ***	28,5 ***	40,3 ***
2	3,3	8,6	16,6	24,7	35,6	2,9 °°	8,4 ns	16,3 ns	24,0 ns	34,7 ns
12	4,3	11,4	17,9	29,8	36,1	3,9 *	10,8 °	18,9 ns	29,5 ns	38,9 **
14	4,6	13,0	20,5	31,3	41,6	10,0 ***	21,1 ***	35,1 ***	47,1 ***	57,2 ***
1	7,2	16,7	28,2	40,8	52,7	9,4 ***	19,9 ***	32,4 ***	44,2 **	58,5 ***
<b>Médias</b>	2,8	7,7	13,5	21,1	28,6	4,3 ***	10,8 ***	18,7 ***	27,7 ***	37,2 ***
<b>CV (%)</b>	64,0	51,0	46,0	42,5	37,7	70,4	52,5	47,5	39,4	34,8
	FS					78,60%	78,60%	78,60%	78,60%	85,70%

FS: Frequência de significância a pelo menos 5% pelo teste F. ns, °, °°, \*, \*\*, \*\*\*, diferença entre as condições fertilidade natural e fertilidade construída não significativa, significativa a 15, 10, 5, 1 e 0,1% pelo teste F. Solos ordenados em ordem crescente do P-rem dos SFN.

Esse fato chama a atenção, já que o SFC 12 apresentou, em relação ao seu respectivo par SFN, reduções altamente significativas na CMAP, Energia e FCP<sub>máx</sub>. Foi verificado, para este solo, redução significativa nos valores de P-rem 15 e 30, estabilidade nas concentrações 45 e 60 e, finalmente, aumento significativo no P-rem 75. Essa sequência de ocorrência indica que a adoção de concentrações de equilíbrio maiores pode ser mais sensível e assertiva às mudanças no FCP.

Os coeficientes de variação desta variável foram 64,0, 51,0, 49,0, 42,5 e 37,7 % nos SFN e 70,8, 52,7, 44,4, 39,4 e 34,8 % nos SFC para as concentrações 15, 30, 45, 60 e 75 mg L<sup>-1</sup>, respectivamente. Estes resultados indicam que há redução na variabilidade dos dados com o aumento da concentração de P na solução de equilíbrio independentemente da condição de uso dos solos. No entanto, ao se comparar o comportamento entre os distintos manejos, verifica-se que os CVs dos SFC são menores que os de SFN somente nas concentrações de P-rem 45, 60 e 75 mg L<sup>-1</sup>.

Portanto, a utilização de maiores concentrações de P na determinação do P-rem retorna os resultados mais esperados, já que, em SFC há aumento no valor do P-rem, e, portanto, espera-se que haja menor CV dos valores desta variável, já que em tese, todas as amostras tenderiam a se aproximar do valor máximo, que é a própria concentração inicial da solução. Todavia, deve-se recordar que principal uso do P-rem é na interpretação do P disponível quando se adota extratores sensíveis ao FCP, como o Mehlich-1. Portanto, a melhor concentração para o P-rem seria aquela capaz de melhor predizer a disponibilidade de P por meio dos Níveis críticos, o que não foi objeto deste estudo.

No procedimento adotado para a determinação do P-rem, as concentrações de 15, 30, 45, 60 e 75 mg L<sup>-1</sup> equivalem às doses de P de 150, 300, 450, 600 e 750 mg dm<sup>-3</sup>, respectivamente. Desta forma, considerando a densidade do solo da tabela 1, constata-se que a concentração de 15 mg L<sup>-1</sup> não é suficiente para atingir a CMAP de nenhum dos 28 solos. Por sua vez, a concentração de 75 mg L<sup>-1</sup> atingiu a CMAP de alguns solos, dentre eles as do solo 12 sob os dois manejos. Infere-se, portanto, que as diferentes concentrações alcançam diferentes regiões de adsorção de P.

Os coeficientes de correlação linear entre o P-rem, em diferentes concentrações, e os demais índices do FCP em SFN, SFC e agrupando-se SFN e SFC estão apresentados na tabela 16. Verifica-se que, independentemente da condição uso, as demais variáveis relacionadas ao FCP, como CT\_MR, CT\_20, CMAP, a constante relacionada à energia de ligação e o FCP<sub>máx</sub> se correlacionam melhor com o P-rem, principalmente nas concentrações mais altas, do que com a proporção de argila. Mesmo no grupo SFN, onde não se espera a saturação dos sítios de adsorção de P, o P-rem foi superior como estimador do FCP.

**Tabela 16.** Coeficientes de correlação linear simples entre o fósforo remanescente (P-rem), nas concentrações de P de 15, 30 45, 60 e 75 mg L<sup>-1</sup>, e a proporção de argila e os demais indicadores do FCP em solos de fertilidade natural (SFN) e construída (SFC).

Indicadores do FCP	CT_MR <sup>(a)</sup>	CT_20 <sup>(a)</sup>	CMAP	Energia	FCP <sub>máx</sub>	P-rem				Argila		
						15	30	45	60		75	
<b>SFN</b>												
<b>P-rem</b>	15	-0,69 **	-0,70 **	-0,86 ***	-0,45 °	-0,63 **	1,00	0,97 ***	0,98 ***	0,97 ***	0,97 ***	-0,52 *
	30	-0,66 **	-0,67 **	-0,88 ***	-0,49 *	-0,67 **			0,98 ***	0,98 ***	0,98 ***	-0,46 *
	45	-0,69 **	-0,69 **	-0,88 ***	-0,49 *	-0,66 **				0,96 ***	0,98 ***	-0,50 *
	60	-0,77 ***	-0,78 ***	-0,93 ***	-0,54 *	-0,74 **					0,99 ***	-0,57 *
	75	-0,75 ***	-0,76 ***	-0,94 ***	-0,56 *	-0,74 **						-0,57 *
<b>Argila</b>		0,67 **	0,67 **	0,71 **	0,52 *							
<b>SFC</b>												
<b>P-rem</b>	15	-0,70 **	-0,68 **	-0,73 **	-0,77 ***	-0,83 ***	1,00	0,99 ***	0,98 ***	0,97 ***	0,96 ***	-0,28 <sup>ns</sup>
	30	-0,71 **	-0,70 **	-0,79 ***	-0,76 ***	-0,87 ***			0,99 ***	0,99 ***	0,98 ***	-0,30 <sup>ns</sup>
	45	-0,76 **	-0,73 **	-0,81 ***	-0,76 ***	-0,89 ***				0,99 ***	0,98 ***	-0,35 <sup>ns</sup>
	60	-0,73 **	-0,71 **	-0,84 ***	-0,73 **	-0,89 ***					0,99 ***	-0,32 <sup>ns</sup>
	75	-0,69 **	-0,71 **	-0,86 ***	-0,72 **	-0,91 ***						-0,57 *
<b>Argila</b>		0,71 **	0,63 *	0,57 *	0,15 <sup>ns</sup>	0,41 °						
<b>SFN e SFC</b>												
<b>P-rem</b>	15	-0,68 ***	-0,68 ***	-0,75 ***	-0,62 ***	-0,59 ***	1,00	0,98 ***	0,97 ***	0,96 ***	0,95 ***	-0,30 *
	30	-0,68 ***	-0,68 ***	-0,81 ***	-0,63 ***	-0,64 ***			0,99 ***	0,99 ***	0,98 ***	-0,31 °
	45	-0,72 ***	-0,72 ***	-0,84 ***	-0,63 ***	-0,67 ***				0,98 ***	0,98 ***	-0,35 *
	60	-0,76 ***	-0,76 ***	-0,88 ***	-0,65 ***	-0,71 ***					0,99 ***	-0,38 *
	75	-0,75 ***	-0,74 ***	-0,89 ***	-0,64 ***	-0,72 ***						-0,40 *
<b>Argila</b>		0,64 ***	0,62 ***	0,59 ***	0,32 *	0,39 *						

Capacidade Tampão de Fosfato no Ponto de mudança de região (CT\_MR) e em 20 mol de P 10<sup>-8</sup> g<sup>-1</sup> (CT\_20); Capacidade Máxima de Adsorção de Fosfato (CMAP), Constante relacionada à energia de ligação (Energia), Fator capacidade máximo de P (FCP<sub>máx</sub>). (a) foram excluídos os dados de CT\_MR e CT\_20 dos solos de fertilidade construída 7 e 14. <sup>ns</sup> \*, \*\*, \*\*\*, não significativo, significativo a 5, 1 e 0,1%.

O  $FCP_{m\acute{a}x}$ , obtido pelo produto entre Energia e CMAP, também apresentou boa correla o com as diferentes concentra es do P-rem em SFC. Segundo Novais e Smyth, o  $FCP_{m\acute{a}x}$    uma medida que reúne informa es sobre a quantidade adsorvida (CMAP) e também sobre a qualidade da adsor o (Energia). Conforme verificado anteriormente, tanto a CMAP quanto a energia sofreram altera es com o cultivo dos solos e o P-rem se mostrou capaz de sintetizar essas mudanças.

A correla o entre P-rem 60 e o teor de argila foi -0,57 nos SFN, -0,32 para os SFC e -0,38 quando se considera ambos os grupos (SFN e SFC), o que demonstra agravamento do distanciamento entre essas variáveis com o cultivo dos solos.

Segundo Novais e Smyth (1999), o teor de argila somente   um bom indicador do FCP para solos com semelhante constitui o mineralógica. Para grupos de solos diversos quanto   qualidade da argila, como o do presente estudo, há consistente perda de correla o (Ker, 1995).

Verifica-se também uma melhor correla o entre o P-rem e a  $CT_{MR}$ ,  $CT_{20}$  e CMAP nos SFN. O mesmo acontece com a constante relacionada   energia de liga o e o  $FCP_{m\acute{a}x}$  nos SFC. No entanto, apesar da redu o da correla o com algumas variáveis, pode-se dizer que o P-rem ainda   um bom estimador do FCP mesmo para SFC.

Apesar dos longos anos de cultivo, há no Brasil, ainda, muitas áreas recém abertas e ou degradadas. Disto presume-se que nos laboratórios de análise de solo cheguem amostras de áreas de fertilidade construída e também áreas com fertilidade próxima   condi o natural, o que demanda um indicador do FCP que seja sensível às diferentes situa es de manejo. A julgar pela correla o entre CMAP e o P-rem 60 no conjunto de solos provindos de áreas com ambas situa es de manejo (SFN e SFC), cujo valor foi -0,88 e altamente significativo, pode-se dizer que este indicador pode atender   essa demanda.

Os resultados indicam que o P-rem, independentemente da concentra o utilizada, se comporta de maneira dinâmica e, portanto, sensível às altera es no FCP dos solos com o cultivo. Desta forma, essa variável se classifica como uma propriedade ao invés de uma característica, já que   passível de altera es no curto prazo. Isso o torna vantajosa em rela o   outras medidas do FCP mais est ticas, como o teor de argila, que apresentam pequena ou nula varia o no curto prazo e baixa sensibilidade às altera es em fun o do manejo.

### 3.5 Concentração de enxofre (S-M1) no extrato de Mehlich-1

Os resultados das concentrações de S-M1, em  $\text{mg L}^{-1}$ , foram apresentados na tabela 17. Os valores mínimos, máximos, média e o coeficiente de variação de S-M1 foram, nos SFN, respectivamente, 251,2, 394,8, 316,5  $\text{mg L}^{-1}$  e 11,5%. Já nos SFC, os valores para essas respectivas variáveis foram 276,6, 390,0, 320,1  $\text{mg L}^{-1}$  e 9,8%.

**Tabela 17.** Concentração de enxofre no extrato de Mehlich-1 (S-M1) de amostras de solos de fertilidade natural (SFN) e construída (SFC).

Solo	SFN	SFC
	$\text{mg L}^{-1}$	
4	251,2	283,3 ***
5	281,4	312,3 ***
10	292,9	312,7 ***
3	286,3	280,7 <sup>ns</sup>
11	313,2	313,9 <sup>ns</sup>
13	302,5	276,6 ***
9	300,4	303,1 <sup>ns</sup>
7	334,4	337,0 <sup>ns</sup>
8	351,5	357,8 <sup>ns</sup>
6	342,8	333,5 <sup>oo</sup>
2	329,4	329,8 <sup>ns</sup>
12	302,9	307,3 <sup>ns</sup>
14	347,8	344,2 <sup>ns</sup>
1	394,8	390,0 <sup>ns</sup>
<b>Médias</b>	<b>316,5</b>	<b>320,13 *</b>
	<b>FS</b>	<b>28,6%</b>

FS: Frequência de significância a pelo menos 5% pelo teste F. <sup>ns</sup>, <sup>oo</sup>, \*, \*\*\*, diferença entre as condições não cultivada e cultivada não significativa, significativa a 10, 5, e 0,1% pelo teste F. Solos ordenados em ordem crescente do P-rem dos SFN.

Nos solos originalmente mais tamponados (4, 5 e 10), houve significativo aumento na S-M1, o que indica que o cultivo dos solos resultou em menor desgaste do extrator nestes solos. No solo 13, inverteu a tendência, já que o valor de S-M1 no SFC foi significativamente menor que no respectivo SFN. Como discutido anteriormente, o cultivo do solo parece ser mais recente neste local, com tempo insuficiente para alterar o FCP do solo. Nos outros 10 solos, não foi verificada alteração significativa a 5% de probabilidade nesta variável.

O extrator Mehlich-1 apresenta dois mecanismos para a extração do P-lábil do solo: a acidificação e a troca de ligantes, que ocorre entre o sulfato do extrator e o fosfato disponível presente no solo. Em solos com maior FCP e, portanto, com mais sítios de

adsorção de ânions, verifica-se menor atividade do sulfato na suspensão solo-extrator, uma vez que o sulfato do Mehlich-1 é também adsorvido nestes sítios, o que configura perda do poder de extração do extrator (Novais e Smyth, 1999; Novais et al., 2015).

Nesta situação, compreende-se menor taxa de recuperação pelo extrator (Reis, 2020; Possamai, 2003) e conseqüentemente menores níveis críticos de P para a interpretação da disponibilidade deste nutriente em solos mais tamponados (Freire et al., 1979; Muniz et al., 1987; Alvarez et al., 1999); No entanto, a contínua adubação fosfatada ao longo dos anos tende a saturar os sítios de adsorção, principalmente aqueles de maior afinidade, o que tende a reverter este cenário.

Novais et al. (2015) verificaram que o desgaste químico do extrator em função do FCP ajusta-se a um modelo linear platô. Esta descontinuidade no ajustamento indicou, naquele estudo, que o desgaste só foi dependente do FCP para amostras com P-rem 60 menor que 19,7 mg L<sup>-1</sup>.

No presente estudo, os coeficientes de correlação (tabela 18) também revelaram dependência da SM-1 ao FCP nos SFC. Apesar de não ocorrer bom ajuste do modelo linear platô entre as variáveis P-rem 60 e SM-1, percebeu-se, por método iterativo, que o R<sup>2</sup> da regressão linear entre estas duas variáveis é crescente até o valor de 24,7 mg L<sup>-1</sup>, o que indica perda de dependência a partir deste valor. Reis (2020) também constatou que, para valores de P-rem 60 superiores a 20 mg L<sup>-1</sup>, ocorre perda de dependência dos níveis críticos de P determinados pelo extrator Mehlich-1 em relação ao P-rem, apesar de não ter sido encontrado ajuste satisfatório das variáveis ao modelo linear-platô.

**Tabela 18.** Coeficientes de correlação linear simples entre indicadores do FCP e a concentração de enxofre no extrato de Mehlich-1 (S-M1) de amostras de solos de fertilidade natural (SFN) e construída (SFC).

CT_MR	CT_20	CMAP	Energia	FCP <sub>máx</sub>	P-rem 60	Argila
<b>SFN</b>						
-0,75 **	-0,68 **	-0,89 ***	-0,80 ***	-0,84 ***	0,87 ***	-0,65 **
<b>SFC</b>						
-0,85 **	-0,82 **	-0,91***	-0,52 *	-0,85 ***	0,86 ***	-0,61 **

Capacidade Tampão de Fosfato no Ponto de mudança de região (CT\_MR) e em 20 mol de P 10<sup>-8</sup> g<sup>-1</sup> (CT\_20); Capacidade Máxima de Adsorção de Fosfato (CMAP), Constante relacionada à energia de ligação (Energia), Fator capacidade máximo de P (FCP<sub>máx</sub>); <sup>(a)</sup> foram excluídos os dados de CT\_MR e CT\_20 das amostras cultivadas dos solos 7 e 14 nas correlações \*, \*\*, \*\*\*, significativo a 5, 1 e 0,1%.

O fato de o desgaste químico do extrator ter sido significativamente menor apenas nos SFC originalmente mais tamponados pode ser atribuído ao fato de que, nos solos com tamponamento intermediário ou baixo, esse desgaste já tende a ser reduzido ou mesmo inexistente. Infere-se, também, que com o menor desgaste do extrator, as taxas de recuperação e os níveis críticos de P sejam alterados. No entanto, como alguns solos de fertilidade construída apresentam valores P-rem inferiores a 20 mg L<sup>-1</sup>, conclui-se que os índices do FCP ainda sejam necessários para a interpretação da disponibilidade de P nestes solos.

### 3.6 Resposta de plantas à adubação em solos cultivados e não cultivados

#### 3.6.1 Crescimento e acúmulo de P na parte aérea de plantas

A produção de matéria seca (mMS\_PA) e o conteúdo de P na parte aérea (cP-PA) das plantas nos SFN e SFC na ausência de adubação estão apresentados na tabela 19. Os valores para essas mesmas variáveis quando os mesmos solos receberam adubação fosfatada estão na tabela 20.

**Tabela 19.** Produção de matéria seca (mMS\_PA) e o conteúdo de P na parte aérea (cP-PA) de plantas cultivadas sem adubação fosfatada em solos de fertilidade natural (SFN) e construída (SFC).

SOLO	SFN		SFC	
	mMS_PA	cP-PA	mMS_PA	cP-PA
	g vaso <sup>-1</sup>	mg vaso <sup>-1</sup>	g vaso <sup>-1</sup>	mg vaso <sup>-1</sup>
4	2,02	2,00	10,15 ***	12,13 ***
5	3,37	4,90	22,19 ***	27,93 ***
3	1,53	1,17	7,91 ***	7,93 ***
7	1,94	1,83	43,03 ***	144,56 ***
6	3,58	3,00	9,64 ***	12,13 ***
2	2,50	2,43	5,31 °	6,16 °°
1	2,71	2,90	19,85 ***	23,93 ***
<b>Médias</b>	2,52	2,60	16,87 ***	<b>33,54 ***</b>
		FS	85,7%	<b>85,7%</b>

FS: Frequência de significância a pelo menos 5% pelo teste F. °, °°, \*\*\*, diferença entre as condições fertilidade natural e fertilidade construída não significativa, significativa a 15, 10, e 0,1% pelo teste F. Solos ordenados em ordem crescente do P-rem dos SFN.

Verificou-se que, na ausência de adubação fosfatada, o crescimento das plantas e o acúmulo de P foram significativamente superiores nos SFC em relação aos respectivos

SFN. Em média, a mMS\_PA e o cP-PA foram 6,69 e 12,9 vezes maiores nesses solos, respectivamente.

Conforme a expectativa, os maiores valores para essas variáveis foram encontrados no SFC 7, tendo em vista ser aquele que apresenta maior disponibilidade relativa de P pelo extrator Mehlich-1 e maior teor de P disponível pelo extrator Resina mista. Esses resultados indicam que, de fato, os SFC maior fator quantidade (Q) de P, decorrente do acúmulo deste nutriente após anos de cultivo, aproximando-os do caráter “Fonte”.

Com adubação, as médias de mMS\_PA e cP-PA aumentaram 7,22 e 6,48 vezes nos SFN, respectivamente. Já nos SFC, o incremento foi 1,51 e 1,31 vezes para as respectivas variáveis. Destaca-se que, no SFC 7, a adubação reduziu a produção de matéria seca e o acúmulo de P na parte aérea das plantas.

Verificou-se, para as variáveis supracitadas na presença de adubação fosfatada, menores significância para o efeito da condição de uso nos solos originalmente menos tamponados, o que indica que o efeito da construção de fertilidade é mais facilmente superado pela adubação nos solos com menor FCP.

**Tabela 20.** Produção de matéria seca (mMS\_PA) e conteúdo de P na parte aérea (cP-PA) de plantas cultivadas com adubação fosfatada em solos de fertilidade natural (SFN) e construída (SFC).

SOLO	SFN		SFC	
	mMS_PA	cP-PA	mMS_PA	cP-PA
	g vaso <sup>-1</sup>	mg vaso <sup>-1</sup>	g vaso <sup>-1</sup>	mg vaso <sup>-1</sup>
4	11,37	11,23	21,47 ***	23,03 °°
5	16,64	11,46	29,35 ***	42,00 ***
3	12,42	11,80	22,70 ***	28,17 **
7	21,33	19,53	38,87 ***	127,13 ***
6	22,10	21,60	22,91 ns	28,77 ns
2	20,60	16,57	15,70 °°	18,30 ns
1	22,95	23,97	27,80 °°	43,63 ***
<b>Médias</b>	18,20	16,84	25,54 ***	44,19 ***
	FS		57,1%	57,1%

FS: Frequência de significância a pelo menos 5% pelo teste F. ns, °°, \*\*, \*\*\*, diferença entre as condições fertilidade natural e fertilidade construída não significativa, não significativo, significativo a 10, 1 e 0,1% pelo teste F. Solos ordenados em ordem crescente do P-rem dos SFN.

Nos SFN, o crescimento das plantas e o acúmulo de P após a aplicação de doses de P foi dependente do FCP, o que indica que solos originalmente mais tamponados devem receber maiores doses de P, em função da competição entre o solo e a planta por este elemento. Para os SFC, essa dependência não foi verificada, o que indica que o fator quantidade seja mais importante para definir o potencial de resposta, principalmente em situações que privilegiam a menor competição entre o P e o solo, como na adubação localizada.

Os resultados supracitados corroboram aqueles encontrados por outros autores que estudaram a resposta de plantas à adubação fosfatada. Bahia Filho (1974) também verificou que, na ausência de adubação, não há dependência da produção de matéria seca ao FCP e segundo o autor, as respostas das plantas se devem mais ao fator quantidade. Reis (2020) também verificou, em casa de vegetação, que plantas crescidas em solos com histórico de cultivo foram as que mais produziram no tratamento testemunha. Entretanto, ambos os autores verificaram que as doses de P necessárias para se alcançar a máxima produção e acúmulo de P são dependentes do FCP.

### **3.6.2 Produção Relativa, taxa de recuperação pelas plantas e eficiência do uso do P**

A relação entre a produção de matéria seca sem e com adubação (PR) apresentou médias de 14,2 e 50,8 % nos SFN e SFC, respectivamente (tabela 21), o que comprova o menor potencial de resposta à adubação nos solos de fertilidade contruída. Resultados semelhantes foram encontrados por Reis (2020), que também constatou menor resposta à adubação em solos com histórico de cultivos.

Não foi verificada relação entre a PR e o FCP, independentemente do manejo, o que pode ser explicado pelo fato das doses de P terem sido definidas em função do FCP e a adubação localizada do P tende a mitigar os efeitos do FCP na aquisição por este elemento (Novais e Smith, 1999). Além do mais, como já discutido, a resposta das plantas é mais dependente do fator quantidade (Q).

De maneira geral, a taxa de recuperação do P pelas plantas ( $tr_{PI}$ ) foi maior nos solos menos tamponados, independentemente do manejo, o que pode ser justificado pela menor competição entre o solo e a planta pelo P adicionado. Corroboram estes resultados os trabalhos de Muniz (1987) e Santos (2008), que verificaram relações inversa entre a  $tr_{PI}$  e o P-rem. Observa-se também redução nos coeficientes de variação da  $tr_{PI}$  nos SFC, o que sugere que solos que originalmente apresentem valores de  $tr_{PI}$  contrastantes, tendem à homogeneização nesta variável na medida em que forem cultivados.

**Tabela 21.** Produção relativa de matéria seca de parte aérea (PR) e taxa de recuperação de P (tr\_Pl) pelas plantas em solos de fertilidade natural (SFN) e construída (SFC).

SOLO	SFN		SFC	
	PR	tr_Pl	PR	tr_Pl
				%
4	17,8	8,2	47,3	9,7
5	20,3	6,8	75,6	14,7
3	12,3	9,5	34,8	18,1
7	9,10	21,6	-	-
6	16,2	19,4	42,1	17,3
2	12,1	17,2	33,8	14,8
1	11,8	30,1	71,4	28,1
<b>Médias</b>	14,2	16,1	50,8	17,1
<b>CV (%)</b>	27,7	52,5	36,0	35,9

- Produção relativa maior que 100 % e taxa de recuperação negativa para o SFC 7. Solos ordenados em ordem crescente do P-rem dos SFN.

Fato notável é que, nos solos 6, 2 e 1, que são aqueles originalmente menos tamponados, houve redução na tr\_Pl nos SFC quando comparados aos respectivos SFN, sugerindo que parte do P adicionado não foi assimilado pelas plantas e que a tr\_Pl é dependente do FCP e da dose de P utilizada. Além disso, fica evidente que a aplicação de elevadas doses de P em solos com histórico de cultivo é ainda mais ineficiente em solos originalmente menos tamponados.

Os resultados do índice de utilização, proposto por Siddiqi e Glass (1981), estão apresentados na tabela 22. Sem adubação, a média deste índice foi 4,22 maior nos SFC em detrimento dos SFN. Por sua vez, a adubação proporcionou incrementos médios de 8,0 e 1,6 vezes no mesmo índice para SFN e SFC, respectivamente. Quando se promoveu a adubação fosfatada em SFN, a maior eficiência no uso do P foi verificada nos solos menos tamponados, com exceção do solo 5 que apresentou elevado valor de índice de utilização apesar de ter também elevado FCP.

Destaca-se que o índice de utilização reduziu com a adubação no SFC 7. Adicionalmente, constata-se que o grupo que apresentou maior valor médio no referido índice foi SFN quando receberam adubação fosfatada. Somente os SFC mais tamponados, com exceção da amostra 5, apresentaram índices de utilização maiores que seus respectivos pares SFN após a adubação, o que demonstra, novamente, a acentuação da ineficiência da adubação fosfatada nos SFC originalmente menos tamponados.

**Tabela 22.** Índice de utilização de P, segundo Siddiqi e Glass (1981), de plantas cultivadas com e sem adubação fosfatada em solos de fertilidade natural (SFN) e construída (SFC).

Solo	Não adubado		Adubado	
	SFN	SFC	SFN	SFC
	$g^2 mg^{-1}$			
4	2,04	8,49	11,51	20,02
5	2,32	17,63	24,16	20,51
3	2,00	7,89	13,07	18,29
7	2,06	12,81	23,30	11,88
6	4,27	7,66	22,61	18,24
2	2,57	4,58	25,61	13,47
1	2,53	16,47	21,97	17,71
<b>Média</b>	<b>2,54</b>	<b>10,79</b>	<b>20,32</b>	<b>17,16</b>

Solos ordenados em ordem crescente do P-rem dos SFN.

### 3.6.3 Teores de P disponíveis pelos extratores Mehlich-1 e Resina Mista

Os teores de P recuperados pelos extratores Mehlich-1 (tP\_M1) e resina mista (tP\_Res) no SFN e SFC adubados e não adubados com fertilizante fosfatado constam na tabela 23.

Constata-se, como esperado, que os teores de P, por ambos os extratores, aumentaram com o cultivo e com a adubação fosfatada. Os coeficientes de variação dos teores de P pelos extratores Mehlich-1 e Resina foram 67,3 e 36,9 % nos SFN não adubados, respectivamente. Já para os SFC não adubados foram 89,3 e 73,01 %, respectivamente. A maior variabilidade verificada para o extrator Mehlich-1 se deve à sensibilidade deste ao FCP e à conseqüente menor taxa de recuperação em solos mais tamponados. A maior variabilidade em SFC, mesmo para um extrator menos sensível ao FCP, como a resina, indica que diferentes doses de P foram aplicadas nos diferentes SFC durante o processo de construção de fertilidade.

As taxas de recuperação de P pelos extratores Mehlich-1 (M-1) e Resina mista (Resina) em solos de fertilidade natural (SFN) e de fertilidade construída (SFC) estão apresentadas na tabela 24. Verificou-se que a recuperação do P adicionado foi sempre maior pela resina mista, independentemente do manejo. Da mesma forma, nos SFC as taxas foram maiores independentemente do extrator, com acréscimo de 2,63 vezes para o Mehlich-1 e 1,97 vezes para a resina mista.

**Tabela 23.** Teores de P disponível pelos extratores Mehlich-1 (tP\_M1) e Resina mista (tP\_Res) em solos de fertilidade natural (SFN) e construída (SFC) não adubados e adubados com fertilizante fosfatado.

Solo	Não adubado				Adubado			
	SFN		SFC		SFN		SFC	
	tP_M1	tP_Res	tP_M1	tP_Res	tP_M1	tP_Res	tP_M1	tP_Res
	mg dm <sup>-3</sup>							
4	1,6	17,5	29,6 ***	136,2 ***	4,0	38,7	41,0 ***	175,5 ***
5	7,9	20,2	45,0 ***	103,2 ***	15,3	35,3	59,0 ***	129,0 ***
3	0,9	8,3	11,2 °°	55,7 ***	4,6	26,5	15,9 ns	72,8 *
7	3,4	10,7	150,0 ***	265,2 ***	8,3	20,7	150,0 ***	261,2 ***
6	7,3	11,8	56,7 ***	109,2 ***	14,6	25,3	74,3 ***	140,5 ***
2	2,6	10,7	24,6 ***	48,3 *	5,0	17,2	40,6 ***	74,2 **
1	4,7	8,2	41,0 ***	35,7 °°	14,2	17,5	62,3 ***	52,8 °°
<b>Médias</b>	4,1	12,5	51,3 ***	107,6 ***	9,4	25,9	63,3 ***	132,1 ***
	FS		85,7%	85,7%			85,7%	85,7%

FS: Frequência de significância a pelo menos 5% pelo teste F. ns, °°, \*, \*\*, \*\*\*, diferença entre as condições fertilidade natural (SFN) e fertilidade construída (SFC) não significativa, significativa a 10, 5, 1 e 0,1% pelo teste F. Solos ordenados em ordem crescente do P-rem dos SFN.

Os resultados contrastam com aqueles observados por Reis (2020), que encontrou taxas de recuperação médias de 24,0 e 45,1 % para resina e Mehlich-1, respectivamente. Essa diferença pode ser explicada pelo fato que parte da quantidade de P usada por aquele autor teve como fonte o fosfato natural que é rico em forma de P ligadas a Ca e, portanto, que são mais solubilizadas pelo extrator Mehlich-1 e menos pela resina mista. Inesperadamente, as taxas de recuperação pela resina mista em SFN aumentaram com o tamponamento do solo. No entanto, nos SFC este comportamento não foi observado.

Na tabela 25, estão apresentados os coeficientes de correlação linear simples entre os teores de P disponível pelos extratores Mehlich-1 e Resina mista (Resina) e o conteúdo de P de plantas cultivadas em solos de fertilidade natural (SFN) e construída (SFC) não adubados e adubados com fertilizante fosfatado. Melhor correlação foi observada para o extrator Mehlich-1 em SFN não adubados, o que indica que este extrator foi superior à resina mista nesta situação. Resultados semelhantes foram encontrados por Reis (2020).

**Tabela 24.** Taxa de recuperação de P pelos extratores Mehlich-1 (M-1) e Resina mista (Resina) em solos de fertilidade natural (SFN) e construída (SFC).

Solo	tr Ext			
	M-1		Resina	
	SFN	SFC	SFN	SFC
			%	
4	4,3	20,4	37,8	70,3
5	15,4	29,2	31,6	53,8
3	6,6	8,3	32,4	30,6
7	11,8	-	24,4	-
6	15,1	36,7	28,1	65,3
2	5,9	39,0	15,9	63,0
1	27,1	60,6	26,7	49,1
<b>Média</b>	12,3	32,4	28,1	55,3
<b>CV (%)</b>	63,9	55,1	24,7	26,0

- Não foi possível obter as taxas de recuperação, para ambos extratores, para o SFC 7. Solos ordenados em ordem crescente do P-rem dos SFN.

**Tabela 25.** Coeficientes de correlação linear simples entre os teores de P disponível pelos extratores Mehlich-1 e Resina mista (Resina) e o conteúdo de P de plantas cultivadas em solos de fertilidade natural (SFN) e construída (SFC) não adubados e adubados com fertilizantes fosfatado.

Extrator	SFN <sup>(a)</sup>		SFC <sup>(b)</sup>	
	Não adubado	Adubado	Não adubado	Adubado
Mehlich-1	0,87 *	0,49 <sup>ns</sup>	0,55 <sup>ns</sup>	0,46 <sup>ns</sup>
Resina	0,63 °	-0,75 °	0,06 <sup>ns</sup>	0,05 <sup>ns</sup>

ns, °, \*; não significativo, significativo a 10 e 5 %, respectivamente. <sup>(a)</sup>: n = 7; <sup>(b)</sup>: n = 6, foram excluídos os dados do SFC 7.

Inesperadamente, foi constatado correlação negativa para a resina mista em SFN não adubados. Nenhum dos dois extratores apresentou boa correlação com o acúmulo de P pelas plantas cultivadas em SFC, embora as correlações com o Mehlich-1 tenham sido numericamente superiores que a resina mista. Este fato sugere que, em SFC, os extratores convencionais já não sejam tão efetivos para predizer a disponibilidade de P.

Resultados semelhantes foram encontrados nas correlações entre as taxas de recuperação de P pelos extratores e pelas plantas (tabela 26). Mais uma vez, maior correlação foi encontrada para o extrator Mehlich-1 em SFN, o que confirma que, assim como esse extrator, as plantas também são sensíveis ao FCP e, portanto, recuperam menos

P em solos mais tamponados. Já em SFC, as correlações não foram significativas, reforçando a perda de capacidade preditiva de ambos os extratores nesta condição.

**Tabela 26.** Coeficientes de correlação linear simples entre as taxas de recuperação de P dos extratores (tr\_Ext) Mehlich-1 e Resina mista (Resina) e a taxa de recuperação de P pelas plantas (tr\_Pl) cultivadas em solos de fertilidade natural (SFN) e construída (SFC).

Extrator	SFN <sup>(a)</sup>	SFC <sup>(b)</sup>
Mehlich-1	0,69 °	0,67 <sup>ns</sup>
Resina	-0,54 <sup>ns</sup>	-0,49 <sup>ns</sup>

ns, °. não significativo e significativo a 10 %, respectivamente. <sup>(a)</sup>: n = 7; <sup>(b)</sup>: n = 6, foram excluídos os dados do SFC 7.

A variabilidade nas taxas de recuperação, medida pelo coeficiente de variação (CV), pelo extrator Mehlich-1 foi 2,58 maior que aquela encontrada para resina mista nos SFN e 2,11 vezes maior nos SFC. A variabilidade das taxas para resina mista se manteve estável entre os diferentes manejos. Portanto, verifica-se, neste trabalho, a maior sensibilidade do extrator Mehlich-1 ao FCP dos solos. Apesar da menor variabilidade nos SFC, verifica-se, ainda, a necessidade de indicadores do FCP para melhor avaliação dos teores de P recuperados por extratores sensíveis.

### 3.6.4 Importância dos índices do FCP para predição da dinâmica do P em solos cultivados

Ao se analisar a tabela 27, constatou-se que, nos SFN, o crescimento, o acúmulo de P e a taxa de recuperação deste nutriente pelas plantas apresentam forte dependência do FCP, já que foram observados elevados e significativos coeficientes de correlação entre as variáveis relacionadas ao crescimento das plantas e aquelas relacionadas ao tamponamento dos solos, o que corrobora a tendência clássica de maior competição, pelo P adicionado, entre a planta e o solo nos solos mais tamponados.

Os resultados da taxa de recuperação do P pelo extrator Mehlich-1, reconhecidamente sensível ao FCP, também apresentaram tendência de dependência ao FCP nos SFN, embora as correlações não tenham sido elevadas.

SFC, entretanto, apresentaram baixas correlações entre as variáveis relacionadas à resposta das plantas e os principais indicadores do FCP, exceto a constante relacionada à energia de ligação, o que sugere que o conhecimento desta variável ganha importância para se entender a dinâmica do P nesses solos.

Ressalta-se que, conforme discutido nos tópicos anteriores, SFC apresentaram redução no tamponamento de fosfato, mas ainda preservam considerável variabilidade nos indicadores do FCP, o que indica resiliência nesta propriedade. A boa correlação entre o P-rem 60 e a taxa de recuperação de P pelas plantas indica que as plantas apresentam sensibilidade ao FCP mesmo nos SFC. No entanto, como esses solos também apresentam maior reserva de P (fator Q), essa sensibilidade não foi suficiente para afetar significativamente a produção e o acúmulo de P pelas plantas.

**Tabela 27.** Coeficientes de correlação linear simples entre indicadores do FCP e a Produção de matéria seca (mMS\_PA) e conteúdo de P na parte aérea (cP-PA) de plantas cultivadas com adubação fosfatada, taxa de recuperação de P de plantas (tr\_PI) e pelos extratores Mehlich-1 (tr\_M1) e resina mista (tr\_res).

	CT_MR	CT_20	CMAP	Energia	FCP <sub>máx</sub>	Argila	P-rem	S-M1
<b>SFN<sup>(a)</sup></b>								
<b>mMS_PA</b>	-0,94 **	-0,94 **	-0,88 **	-0,87 *	-0,88 **	-0,75 °	0,83 *	0,91 *
<b>cP_PA</b>	-0,80 *	-0,80 *	-0,91 **	-0,83 *	-0,84 *	-0,84 *	0,92 **	0,95 **
<b>tr_PI</b>	-0,75 *	-0,76 *	-0,93 **	-0,78 *	-0,82 *	-0,79 *	0,96 **	0,96 **
<b>tr_M1</b>	-0,59 ns	-0,58 ns	-0,53 ns	-0,61 ns	-0,52 ns	-0,54 ns	0,73 °	0,76 *
<b>tr_res</b>	0,79 *	0,79 *	0,74 °	0,67 °	0,77 °	0,48 ns	-0,57 ns	-0,61 °
<b>SFC<sup>(b)</sup></b>								
<b>mMS_PA</b>	0,05 ns	0,05 ns	0,06 ns	-0,78 °	-0,25 ns	0,16 ns	0,37 ns	0,28 ns
<b>cP_PA</b>	-0,20 ns	-0,20 ns	-0,29 ns	-0,92 **	-0,47 ns	0,03 ns	0,57 ns	0,51 ns
<b>tr_PI</b>	-0,68 ns	-0,69 ns	-0,67 ns	-0,85 *	-0,71 ns	-0,65 ns	0,86 *	0,81 *
<b>tr_M1</b>	-0,93 **	-0,92 **	-0,94 **	-0,70 °	-0,91 **	-0,80 °	0,95 **	0,98 **
<b>tr_res</b>	-0,18 ns	-0,16 ns	-0,23 ns	0,30 ns	-0,11 ns	-0,21 ns	0,02 ns	0,07 ns

(a): n = 7; (b): n = 6, foram excluídos os dados do SFC 7; Capacidade Tampão de Fosfato no Ponto de mudança de região (CT\_MR) e em 20 mol de P 10<sup>-8</sup> g<sup>-1</sup> (CT\_20); Capacidade Máxima de Adsorção de Fosfato (CMAP), Constante relacionada à energia de ligação (Energia), Fator capacidade máximo de P (FCP<sub>máx</sub>), proporção de argila (argila), Fósforo remanescente 60 mg L<sup>-1</sup> de P (P-rem) e concentração de enxofre no extrato de Mehlich-1 (S-M1). ns, °, \*, \*\*, não significativo, significativo a 15, 5 e 1 %.

Fortes correlações foram encontradas entre a taxa de recuperação pelo extrator Mehlich-1 e os índices do FCP, sugerindo que, mesmos nos SFC, indicadores do FCP sejam importantes para melhor interpretação dos teores recuperados por este extrator.

Estes resultados vão ao encontro da hipótese sugerida por Novais e Smith (1999) segundo a qual os indicadores do FCP perdem importância para a avaliação da fertilidade em solos de fertilidade melhorada, porque, segundo os autores, esses indicadores avaliam a “quantidade” de adsorção, mas não fornecem nenhuma informação a respeito da

“qualidade” da adsorção. Mesmo o  $FCP_{\text{máx}}$ , que agrega uma medida relacionada à quantidade (CMAP) e outra à qualidade (Energia) da adsorção de fosfato, não se correlacionou bem com indicadores da resposta das plantas nos SFC.

No entanto, ainda que estes indicadores do FCP não sejam mais tão importantes para prever respostas produtivas das plantas, os resultados encontrados sobre a influência do FCP sobre a taxa de recuperação de P pela planta e o Coeficiente de Utilização de P revelam que tais indicadores ainda se mostram indispensáveis para se alcançar manejo eficiente da adubação fosfatada e para se evitar problemas ambientais relacionados a esse elemento.

É importante pontuar também que a magnitude do fator quantidade em solos cultivados determina a maior ou menor dependência do FCP. Como exemplo, os SFC 1, 2, 3, 4, 5 e 6 apresentam disponibilidade de P na amplitude de 1,4 a 5,3 e 1,7 a 4,4 vezes os níveis críticos pelo extrator Mehlich-1 considerando o teor de argila e o P-rem, respectivamente, segundo Alvarez et al. (1999). Já no SFC 7, entretanto, esses respectivos indicadores são 16,4 e 9,7. Essa abundância de P pode ser a razão da resposta negativa à adubação neste solo e o motivo pelo qual os seus dados foram excluídos da análise de correlação entre as variáveis analisadas.

Pelo exposto, percebe-se que o manejo da adubação fosfatada nos SFC carece de novas ferramentas, já que as usuais, embora ainda úteis, tendem à exaustão com o passar dos anos de cultivo. Como verificado, a constante relacionada à energia de ligação apresentou boa capacidade de explicar as respostas das plantas à adubação fosfatada. No entanto, seu caráter empírico e a complexidade operacional para determiná-la sugerem ser necessário o desenvolvimento de outras técnicas capazes de ajudar na predição da resposta das plantas em solos com caráter “Fonte” no suprimento de P.

#### 4. CONCLUSÕES

Solos de fertilidade construída apresentam menores valores de capacidade máxima de adsorção de fosfato (CMAP), da constante de energia de ligação, do fator capacidade máximo de P ( $FCP_{m\acute{a}x}$ ) e da capacidade tampão de fosfato, além de menor desgaste do extrator Mehlich-1, caracterizando menor fator capacidade de P (FCP). Para esses solos, o aumento do valor de P-rem confirma a redução do FCP e evidencia sua sensibilidade às alterações no tamponamento, consolidando-o como indicador eficiente do FCP em diferentes condições de fertilidade.

A construção da fertilidade eleva o fator Quantidade (Q) de P, resultando em maiores teores de fósforo disponível, maior produção de matéria seca e maior acúmulo de P na parte aérea de plantas, mesmo sem adubação, além de menor resposta às aplicações de P.

A atividade de P na solução em solos de fertilidade construída só aumenta de forma significativa em solos de fertilidade construída com elevadíssima disponibilidade de P. Nessas condições a expressão do fator intensidade como potencial de fosfato monocálcico pode levar à interpretações equivocadas da capacidade tampão de fosfato (CTP).

Dentre os indicadores do FCP, para solos de fertilidade construída, a constante relacionada à energia de ligação foi o único que se correlacionou significativamente com o acúmulo de matéria seca e de P nas plantas. No entanto, outros indicadores do FCP, tais como P-rem e teor de argila, ainda são relevantes para a definição da dose de P para um manejo mais eficiente da adubação fosfatada.

## 5. BIBLIOGRAFIA

- ALVAREZ V., V.H.; FONSECA, D.M. Definição de doses de fósforo para determinação da capacidade máxima de adsorção de fosfatos e para ensaios de casa de vegetação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 14, p. 49-55, 1990.
- ALVAREZ V., V.H. et al. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G.; ALVAREZ V., V.H. (eds.). *Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação*. Viçosa, MG: CFSEMG, 1999. p. 25-32.
- ALVAREZ V., V.H. et al. Determinação e uso do fósforo remanescente. *Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo*, v. 25, p. 27-33, 2000.
- ASLYNG, H.C. The lime and phosphate potentials of soils; the solubility and availability of phosphates. *Yearbook Royal Veterinary and Agricultural College, Copenhagen*, p. 1-50, 1954.
- BACHE, B.W.; WILLIAMS, E.G. A phosphate sorption index for soils. *Journal of Soil Science*, v. 22, p. 289-301, 1971.
- BAHIA FILHO, A.F.C. Fósforo em Latossolos do estado de Minas Gerais: intensidade, capacidade tampão e quantidade de fósforo, fósforo “disponível” e crescimento vegetal. 1974. 76 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1974.
- BOLLAND, M.D.A. et al. Comparison of seven phosphorus sorption indices. *Australian Journal of Soil Research*, v. 34, p. 81-89, 1996.
- BRAGA, J.M.; DEFELIPO, B.V. Determinação espectrofotométrica de fósforo em extratos de solo e material vegetal. *Revista Ceres*, v. 21, p. 73-85, 1974.
- BRAGA, J.M. Formas de potássio e estabelecimento de nível crítico para alguns solos do Estado de Minas Gerais. 1972. 148 f. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 1972.
- BARROW, N.J. Effect of previous additions of phosphate on phosphate adsorption by soils. *Soil Science*, v. 118, p. 82-89, 1974.
- BARROW, N.J. Relationship between uptake of phosphorus by plants and the phosphorus potential and buffering capacity of the soil: an attempt to test Schofield's hypothesis. *Soil Science*, v. 104, p. 99-106, 1967.
- BARROW, N.J.; OZANNE, P.G.; SHAW, T.C. Nutrient potential and capacity. I. The concepts of nutrient potential and capacity and their application to soil potassium and phosphorus. *Australian Journal of Agricultural Research*, v. 16, p. 61-76, 1965.

- BERWANGER, A.L.; CERETTA, C.A.; SANTOS, D.R. Alterações no teor de fósforo no solo com aplicação de dejetos líquidos de suínos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, p. 2525-2532, 2008.
- DONAGEMMA, G.K. et al. Dispersão de Latossolos em resposta à utilização de pré-tratamentos na análise textural. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 27, p. 765-772, 2003.
- FABRES, A.S. et al. Níveis críticos de diferentes frações de fósforo em plantas de alface cultivadas em diferentes solos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 11, p. 51-57, 1987.
- FREIRE, F.M. et al. Adubação fosfatada para a cultura da soja (*Glycine max* (L.) Merrill) baseada no fósforo “disponível” em diferentes extratores químicos e no “fator capacidade”. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 3, p. 105-111, 1979.
- JENSEN, H.E. Phosphate potential and phosphate capacity of soils. *Plant and Soil*, v. 33, p. 17-29, 1970.
- KER, J.C. Mineralogia, sorção e dessorção de fosfato, magnetização e elementos traços de Latossolos do Brasil. 1995. 181 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1995.
- KURTZ, L.T.; QUIRK, J.P. Phosphate adsorption and phosphate fractions in field soils of varying histories of phosphate fertilization. *Australian Journal of Agricultural Research*, v. 16, p. 403-412, 1965.
- LOPES, A.S. Available water, phosphorus fixation and zinc levels in Brazilian Cerrado soils in relation to their physical, chemical and mineralogical properties. 1977. 189 f. Tese (Doutorado) – North Carolina State University, Raleigh, 1977.
- LOPES, A.S.; ALVAREZ V., V.H. Apresentação dos resultados das análises de solo. In: RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G.; ALVAREZ V., V.H. (eds.). *Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação*. Viçosa, MG: CFSEMG, 1999. p. 21-24.
- LOPES, A.S.; GUILHERME, L.R.G. A career perspective on soil management in the Cerrado region of Brazil. *Advances in Agronomy*, v. 137, p. 1-72, 2016. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2015.12.004>
- MELLO, J.W.V. et al. Concentrações críticas de fósforo em plantas de arroz cultivadas em solos inundados. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 17, p. 211-216, 1993.

- MULJADI, D. et al. The mechanism of phosphate adsorption by kaolinite, gibbsite, and pseudoboehmite. Part I. The isotherms and the effect of pH on adsorption. *Journal of Soil Science*, v. 17, n. 2, p. 222-229, 1966.
- MUNIZ, A.S. et al. Disponibilidade de fósforo e recomendação de adubação avaliadas por meio de extratores químicos e do crescimento de soja em amostras de solo com diferentes valores do fator capacidade. *Revista Ceres*, v. 34, p. 125-151, 1987.
- NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J. Fósforo em solo e planta em condições tropicais. 1. ed. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 1999.
- NOVAIS, R.F. Phosphorus supplying capacity of previously heavily fertilized soils. 1977. 118 f. Tese (Doutorado) – North Carolina State University, Raleigh, 1977.
- NOVAIS, R.F. et al. The influence of the soil phosphate capacity factor on soil and plant phosphorus critical levels of different vegetables. In: FRAGOSO, M.A.C.; BEUSICHEM, M.L.V. (eds.). *Optimization of plant nutrition*. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1993. p. 73-76.
- NOVAIS, R.F. et al. Ensaio em ambiente controlado. In: OLIVEIRA, A.J. et al. *Métodos de pesquisa em fertilidade do solo*. Brasília, DF: EMBRAPA-SEA, 1991. p. 189-254.
- NOVAIS, R.F. et al. Fósforo. In: NOVAIS, R.F. et al. *Fertilidade do solo*. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 471-537.
- NOVAIS, S.V. et al. Loss of extraction capacity of Mehlich-1 and monocalcium phosphate as a variable of remaining P and its relationship to critical levels of soil phosphorus and sulfur. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 1079, p. 87, 2015.
- NURWAKERA, J. Soil phosphorus dynamics during continuous cultivation in a Brazilian Amazon Oxisol. 1991. 119 f. Dissertação (Mestrado) – North Carolina State University, Raleigh, 1991.
- OLSEN, S.R.; WATANABE, F.S. A method to determine a phosphorus adsorption maximum of soils as measured by the Langmuir Isotherm. *Soil Science Society of America Proceedings*, v. 21, p. 144-149, 1957.
- POSSAMAI, J.M. Sistema de recomendação de corretivos e fertilizantes para o cultivo do algodoeiro. 2003. 91 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2003.
- RAIJ, B. van; QUAGGIO, J.A. Determinação de fósforo, cálcio, magnésio e potássio extraídos com resina trocadora de íons. In: RAIJ, B. van et al. *Análise química para*

- avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 2001. p. 189-195.
- REIS, J.V. et al. Interpretation of soil phosphorus availability by Mehlich-3 in soils with contrasting phosphorus buffering capacity. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 44, e0190113, 2020. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20190113>
- RHEINHEIMER, D.S.; ANGHINONI, I.; CONTE, E. Sorção de fósforo em função do teor inicial e de sistemas de manejo de solos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 27, p. 41-49, 2003.
- RAJAN, S.S.S. Phosphorus adsorption characteristics of Hawaiian soils and their relationships to equilibrium phosphorus concentrations required for maximum growth of millet. *Plant and Soil*, v. 39, p. 519-532, 1973.
- RUIZ, H.A.; FERREIRA, G.B.; PEREIRA, J.B.M. Estimativa da capacidade de campo de Latossolos e Neossolos quartzarênicos pela determinação do equivalente de umidade. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 27, p. 389-393, 2003.
- SANTOS, F.C. et al. Modelagem na recomendação de corretivos e fertilizantes para a cultura da soja. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, p. 1661-1674, 2008.
- SIDDIQUI, M.Y.; GLASS, A.D.M. Utilization index: a modified approach to the estimation and comparison of nutrient utilization efficiency in plants. *Journal of Plant Nutrition*, v. 4, p. 289-302, 1981.
- SMYTH, T.J.; SANCHEZ, P.A. Effects of lime, silicate, and phosphorus applications to an Oxisol on phosphorus sorption and ion retention. *Soil Science Society of America Journal*, v. 44, p. 500-505, 1980.
- YOST, R.S. et al. Phosphorus response of corn on an Oxisol as influenced by rates and placement. *Soil Science Society of America Journal*, v. 43, p. 338-343, 1979.
- WHITE, R.E.; BECKETT, P.H.T. Studies on the phosphate potentials of soils: Part I – The measurement of phosphate potential. *Plant and Soil*, v. 20, n. 1, p. 1-16, 1964.