

FATORES QUE AFETAM A FIXAÇÃO DE FOSFATOS NOS SOLOS DO ESTADO DE SÃO PAULO

MARA REGINA DOS S. RODRIGUES

Engenheiro Agrônomo

Orientador: Dr. Francisco de Assis Ferraz de Mello

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

PIRACICABA
Estado de São Paulo - Brasil
Março, 1980

A minha mãe

"IN MEMORIAM"

A meu pai, irmãs e sobrinho

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Francisco de Assis Ferraz de Mello, pela orientação.

Ao Prof. Dr. Octávio Freire pelas sugestões.

Aos Eng^{os}. Agr^{os} Roza Maria Schunke e Marta Elena Gonzalez Mendes pela colaboração e amizade.

Aos funcionários do Departamento de Solos da ESALQ pela ajuda no decorrer das análises químicas e físicas preliminares.

Ao PICD/CAPES/UFPEL pela concessão de Bolsa de Pós-graduação.

A todos aqueles que direta ou indiretamente colaboraram na realização deste trabalho.

ÍNDICE

	Página
LISTA DE QUADROS	vi
RESUMO	vii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1. Considerações Gerais Sobre o Termo Fixação	4
2.2. Fatores que Afetam a Fixação de Fósforo	5
2.2.1. Influência das argilas	6
2.2.2. Influência do Cálcio e Magnésio	8
2.2.3. Influência da matéria orgânica	10
2.2.4. Influência do pH	12
2.2.5. Influência do alumínio trocável	14
3. MATERIAIS E MÉTODOS	17
3.1. Materiais	17
3.2. Determinação das características físicas e químicas	17
3.2.1. Caracterização física	28
3.2.2. Caracterização química	28
3.3. Determinação da capacidade de fixação de fosfato pelo solo	30
3.3.1. Marcha de determinação	30
3.3.2. Cálculo da porcentagem de fosfato fixado	30
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
4.1. Influência do pH na porcentagem de fosfato fixado	38

4.2. Influência da % de carbono na porcentagem de fixação de fosfato	38
4.3. Influência do P solúvel na capacidade de fixação de fosfatos	39
4.4. Influência do Ca e Mg trocáveis sobre a capacidade de fixação de fosfatos	39
4.5. Influência do Al^{+3} trocável sobre a capacidade de fixação de fosfatos	40
4.6. Influência da capacidade de troca de cations (C.T.C.) sobre a capacidade de fixação de fosfatos	41
4.7. Influência da soma de bases trocáveis na capacidade de fixação de fosfatos	41
4.8. Influência do teor de argila na capacidade de fixação de fosfatos	41
4.9. Influência do teor de Areia Total na capacidade de fixação de fosfato	42
4.10. Influência do teor de limo na capacidade de fixação de fosfato	42
4.11. Correlação linear múltipla entre a capacidade de fixação de fosfato e as características do solo estudadas	43
5. CONCLUSÕES	46
SUMMARY	48
LITERATURA CITADA	50

LISTA DE QUADROS

Quadro nº		Página
1	Resultados da análise granulométrica das 100 amostras de solos	18
2	Resultados da análise química das 100 amostras de solos.	22
3	Resultados do ensaio de fixação de fosfato	33
4	Correlação entre a porcentagem de fósforo fixado e as características do solo consideradas	37
5	Análise de variância final de regressão linear múltipla para Y (% de fósforo fixado) e as variáveis selecionadas X_2 (% de carbono) X_4 (Mg^{++} trocável) e X_5 (Al^{+3} trocável) e X_9 (% de argila)	44

RESUMO

Foi conduzido um experimento em laboratório, utilizando-se 100 amostras de solo oriundas de diferentes localidades do Estado de São Paulo, visando verificar a influência de características químicas e físicas do solo sobre a capacidade de fixação de fosfatos das mesmas.

As amostras de solo foram submetidas preliminarmente à análise química e granulométrica e, posteriormente, ao teste para avaliação da capacidade de fixação de fosfatos.

Os resultados encontrados foram analisados estatisticamente através de correlações lineares simples e correlação linear múltipla, resultando as seguintes conclusões:

1. Com base na análise de regressão linear simples as características do solo que afetaram significativamente a capacidade de fixação de fosfato dos solos do estado de São Paulo foram: porcentagem de carbono, teor de Al^{+3} trocável, C.T.C. porcentagem de argila, pH e porcentagem de areia.

2. Com base na análise de regressão linear múltipla as características que mais influenciaram a capacidade de fixação de fosfato dos solos do Estado de São Paulo foram: porcentagem de carbono, teor de Mg^{+2} trocável, teor de Al^{+3} trocável e porcentagem de argila.

3. A equação que melhor exprime o fenômeno de fixação de fosfatos para solos do Estado de São Paulo pode ser assim expressa:

$$Y = -2,266 - 3,484 \begin{matrix} \%C \\ \text{troçável} \end{matrix} + 3,514 \begin{matrix} Mg^{+2} \\ \text{troçável} \end{matrix} + 5,559 \begin{matrix} Al^{+3} \\ \text{troçável} \end{matrix} + 1,005\% \text{ de argila}$$

4. O fenômeno de fixação de fosfatos pelo solo está sob influência do efeito conjunto das características físicas e químicas do solo sobre o processo.

1. INTRODUÇÃO

Embora a quantidade de fósforo total num solo mineral médio corresponda à do nitrogênio, é muito menor do que a do potássio, do cálcio ou do magnésio. Assume importância ainda maior o fato da maioria do fósforo existente nos solos não ser assimilável pelos vegetais. Além disso quando são adicionadas aos solos quantidades solúveis deste elemento na forma de fertilizantes o seu fósforo é muitas vezes fixado ou tornado inassimilável, mesmo sob condições ideais.

As práticas de adubação em muitas áreas exemplificam muito bem o problema da disponibilidade do fósforo. A necessidade de elevar doses de fertilizantes, quando estão sendo removidas quantidades relativamente pequenas de fósforo, indica que grande parte dos fosfatos adicionados se tornam indisponíveis para os vegetais em crescimento.

Segundo HEMWALL (1957), somente 10 a 30% dos fosfatos solúveis aplicados como fertilizantes são recuperados pelas plantas, o restante, 70 a 90% resulta fixado na fase sólida do solo.

A fixação do fosfato solúvel pelo solo é um fenômeno de importante significado agrícola. Embora seja de natureza complexa e ainda não bem compreendida, numerosas teorias tem sido propostas para explicá-la.

Nos solos ácidos julgam-se que as principais causas de fixação do P sejam a formação de compostos insolúveis com Fe, Al, Ti, Mn, etc., a adsorção aos óxidos hidratados desses metais e aos minerais de argila.

Nos terrenos alcalinos as principais causas da fixação seriam a formação de fosfatos de cálcio insolúveis a adsorção do fosfato às partículas de carbonato de cálcio e a retenção pelas argilas.

Acredita-se que, para as condições gerais dos solos do Estado de São Paulo, a principal causa da fixação do fosfato é a adsorção à superfície das partículas coloidais de óxidos hidratados de ferro, alumínio e outros (MELLO, 1968).

Nem todos os solos apresentam uma mesma capacidade para fixar o fósforo. Dependendo da natureza de seus constituintes e até certo ponto dos processos e fatores envolvidos um dado solo poderá reter uma quantidade de fósforo várias vezes superior à fixada por um outro.

Tendo em vista que a quantidade de fósforo fixada por um solo depende de uma série de características físicas e químicas do mesmo, o presente trabalho tem como objetivo verificar a influência de alguns fatores como pH, percentagem de carbono, teores de argila, limo,

areia, Ca, Mg, Al, trocáveis e de P solúvel sobre a fixação de fosfato por amostras de solos do Estado de São Paulo.

Para atingir esse objetivo tais amostras foram submetidas a análises química e granulométrica e a um teste de capacidade de fixação de fosfatos. As quantidades fixadas foram correlacionadas com as características dos solos mencionadas.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Considerações Gerais Sobre o Termo Fixação

O fenômeno de fixação foi observado inicialmente, segundo HEMWALL (1957), na Europa ao redor de 1850, mas os maiores progressos para o seu esclarecimento se deram a partir de 1930.

KARDOS (1969) define genericamente o termo fixação como sendo o processo através do qual nutrientes prontamente solúveis são transformados em formas menos solúveis através da reação com os componentes orgânicos e inorgânicos do solo restringindo a sua mobilidade no solo e diminuindo a sua disponibilidade às plantas.

Segundo CATANI e PELLEGRINO (1960), fixação é um termo empregado para traduzir a transformação de formas solúveis de fósforo em outras formas menos solúveis. Qualquer fenômeno que determine um decréscimo na concentração do ion ortofosfato de uma solução em contato com o solo é responsável pela fixação.

Diversos dados experimentais parecem indicar que a fixação do ion fosfato não constitui necessariamente perda de disponibilidade

ãs plantas (CATANI, 1947; MENDES, 1950). Constituiria, então, um importante mecanismo de proteção do fósforo contra as perdas através das águas de percolação.

2.2. Fatores que Afetam a Fixação de Fósforo

Grande quantidade de trabalhos indica que a fixação de fósforo pelo solo apresenta correlações com várias características do solo, tais como, matéria orgânica, argila e alumínio trocável ou extraível (AHENKORAH, 1968; FASSBENDER, 1966; HEMWALL, 1957).

BRADFIELD et alii (1935) propuseram a seguinte explicação para os mecanismos envolvidos na fixação do fósforo no solo:

a. Na faixa de pH entre 2,0 a 5,0 a fixação é devida principalmente, à precipitação do fósforo por ions de ferro e alumínio que resultam na solução do solo após gradual dissolução dos óxidos destes elementos;

b. Na faixa de pH de 4,5 a 7,5 os fosfatos são fixados na superfície das partículas de argila (sesquióxidos hidratados e argilas silicatadas);

c. Na faixa de pH de 6,0 a 10, os fosfatos são precipitados por cations divalentes porventura presentes na solução do solo.

De acordo com TISDALE e NELSON (1965), os principais fatores que afetam a fixação de fósforo são os seguintes: tipo de mineral de argila, tempo de reação, pH, temperatura, matéria orgânica, saturação de fósforo no solo e relação R_2O_3/P_2O_5 .

2.2.1. Influência das argilas

ANASTÁCIO (1968) estudando a capacidade de fixação de fósforo em solos brasileiros concluiu que dentre as características do solo o teor de argila tem uma influência relativa na fixação de fósforo. Amostras com teores de argila de 22% fixaram 22% e as amostras com teor de argila de 18% fixaram 20%.

COLLEMAN (1944) investigou a influência da textura das argilas caulinita e montmorilonita na fixação do fósforo em solos dos Estados Unidos. Observou que quase a totalidade do fósforo fixado pelas frações grosseiras (0,2 a 2,0 micra) e fina (menor que 0,2 micra) destes minerais era devido ao capeamento de óxidos livres de ferro e alumínio que os envolve. O autor concluiu que a fixação do fósforo é, indubitavelmente, devido à troca aniônica entre os ions fosfatos e as oxidrilas do capeamento de hidroxidos livres de ferro e alumínio dificilmente removíveis das argilas.

JUO e FOX (1977) estudando as características de adsorção de fosfatos em solos do oeste da Africa encontrou relação entre o conteúdo de argila, óxidos de ferro livre e os teores de fósforo dos solos estudados.

As verificações de HASEMAN et alii (1950) quanto a fixação de fósforo pelas argilas caulinita, ilita, e montmorilonita indicaram aumento com a elevação da temperatura, com o aumento da concentração de fosfatos na solução e com a diminuição do pH. Sugerem a ocorrência de dois estágios no processo de fixação:

a. Uma fixação rápida resultante da reação do fosfato com o alumínio e/ou ferro prontamente disponíveis;

b. Uma fixação mais lenta resultante da reação do fosfato com alumínio e ferro liberados quando da decomposição das argilas acima citadas.

HALL e BAKER (1971) apresentam resultados interessantes sobre a importância do tipo de argila na retenção do fósforo em função do pH. Esses autores constataram que a montmorilonita contribui para aumentar a quantidade de fósforo fixada pelo solo quando o pH se eleva, enquanto a quantidade fixada pela vermiculita diminui com o aumento do pH.

Os solos argilosos requerem uma maior quantidade de fosfato devido sobretudo, a sua elevada capacidade de fixação. Dentre os argilo-minerais os do grupo da vermiculita parecem apresentar maior poder de fixação. Além desse aspecto os argilo-minerais concorrem para uma maior fixação pela liberação do alumínio (COLE e JACKSON, 1950).

Argilo-minerais que possuem grupos OH^- são capazes de reter ions fosfato. MILLAR (1955) adianta que tal processo ocorre principalmente na superfície desses minerais, sem excluir a possibilidade de tais minerais penetrarem entre as suas unidades básicas. Os que concordam que a troca de anions seja responsável pela remoção do fósforo solúvel da solução do solo apontam os átomos de ferro e alumínio expostos da rede cristalina como responsáveis pela retenção do fósforo (BASS e SIELING, 1950).

CATANI e PELLEGRINO (1960), apresentaram dados relacionados com a fixação do fósforo em 15 solos do Estado de São Paulo ricos em óxidos hidratados de ferro e alumínio (terra roxa e roxa misturada). Os valores obtidos para a fixação foram em geral elevados e variaram de 3,5 a 24,0 e.mg de PO_4^{3-} /100g de solo. O solo que mais fixou fósforo apresentou o menor pH, o menor índice de saturação de bases e a maior porcentagem de argila; o menor valor para a fixação foi revelado por um solo muito ácido, com baixa saturação em bases, mas com uma baixa porcentagem de argila.

MELLO (1968), verificou a capacidade de fixação de fosfato de alguns solos do Município de Piracicaba, concluindo haver correlação entre a capacidade de fixação de fosfato das terras estudadas e os seus respectivos teores de limo e de argila.

2.2.2. Influência do Cálcio e Magnésio

BUCKMAN & BRADY (1967), consideram que a fixação de fósforo em solos alcalinos é provocada em parte, pelos compostos de cálcio, além da formação de precipitados.

Para CALVERT et alii (1960), a fixação do fósforo em qualquer solo varia de acordo com cations ativos presentes no sistema. No caso da presença de alumínio e cálcio, a intensidade da fixação decresce nessa mesma ordem. Verificaram que a fixação do fósforo por argilas previamente acidificadas aumenta com a saturação de cálcio devido à formação de fosfatos de cálcio complexos tal como proposto por ELLIS e

TRUOG (1955).

ALLISON (1943), trabalhando com solos podsólicos de Indiana (USA) concluiu que as argilas saturadas com cálcio fixam muito mais fósforo do que aquelas saturadas com sódio, na faixa de pH acima de 4,0, verificou que os ions cálcio aumentaram enormemente a retenção de fosfato pelas argilas. O fenômeno foi explicado admitindo-se que o cálcio forma uma ligação com o ion H_2PO_4 e a micela coloidal. Uma outra explicação é dada por ELLIS e TRUOG (1955) que concluíram que no caso de saturação com cálcio e fixação não se deve à ligação H_2PO_4 -Cálcio-micela como concluiu o autor citado acima e sim, devido a formação de fosfatos complexos sobre as superfícies saturadas.

RAGLAND e SEAY (1957), estudaram o efeito do cálcio trocável sobre a fixação do fósforo pela fração argila de quatro solos podzólicos de Kentucky (USA). Verificaram que nas argilas previamente acidificadas a fixação do fósforo aumentou quando a saturação do cálcio cresceu além de 60%. Admitem que a retenção do fósforo foi devida a formação de fosfatos de cálcio e à ligação H_2PO_4 - cálcio - micela.

O magnésio também reage com o fosfato adicionado aos solos formando fosfato dimagnésico trihidratado ($MgHPO_4 \cdot 3H_2O$) e/ou fosfato trimagnésico ($Mg_3(PO_4)_2$). Por dissolução o fosfato dimagnésico forma o fosfato trimagnésico, menos solúvel em água. (RACZ e SOPER, 1967).

Quatro solos contendo diferentes teores de cálcio e magnésio foram tratados com K_2HPO_4 e KH_2PO_4 e incubados por vários meses (STRONG e RACZ, 1970). Constatou-se a formação de seis diferentes

fosfatos de cálcio e de magnésio: fosfato bicálcico bihidratado ($\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), fosfato octocálcico ($\text{Ca}_4\text{H}(\text{PO}_4)_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), um fosfato de cálcio ($\text{Ca}_4\text{P}_2\text{O}_9$), fosfato de cálcio e magnésio trihidratado ($\text{MgHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) e fosfato trimagnésico com 22 moléculas de água - $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 22\text{H}_2\text{O}$. A conversão das formas mais solúveis foi mais lenta quando se usou o KH_2PO_4 .

De acordo com LINDSAY et alii (1962) o fosfato aplicado em solos com alto teor de cálcio e em solos alcalinos precipita-se usualmente como fosfato bicálcico bihidratado e/ou fosfato octocálcico. Segundo HUFFMAN (1962), a solubilidade em água destes compostos decresce na seguinte ordem: fosfato bicálcico hidratado, fosfato octocálcico e hidroxiapatita.

2.2.3. Influência da matéria orgânica

A influência dos resíduos orgânicos no fenômeno da fixação é bastante controversa. Acredita-se que certos produtos da decomposição da matéria orgânica tais como ácidos orgânicos e humus associam-se com o ferro e alumínio formando complexos; esta associação que resulta na inativação dos íons ferro e alumínio reduz acentuadamente a fixação do fósforo inorgânico (BUCKMAN & BRADY, 1968).

Estudos conduzidos por BHAT e BOYER (1968), em solos tropicais, revelaram uma diminuição na fixação de fosfato e aumento do fósforo isotopicamente trocável pela adição de matéria orgânica. Entretanto, a capacidade de fixação de fósforo era maior nos solos com maior teor de matéria orgânica original.

RODRIGUES e SANCHEZ (1968) em experimentos de laboratório concluíram haver maior capacidade de fixação em solos com maior teor de matéria orgânica.

A matéria orgânica tem influência marcante na fixação de fosfatos e depende, em parte, do seu teor no solo e do seu estágio de mineralização, o conhecimento da quantidade e do grau de intensidade desta fixação (SAUCHELLI, 1965).

LEAL (1971), encontrou correlação altamente significativa entre adsorção de fósforo e matéria orgânica.

TISDALE & NELSON (1970) citando vários trabalhos, mostraram algumas vantagens da matéria orgânica no aumento do fósforo disponível: na decomposição da matéria orgânica, ocorre despreendimento de dióxido de carbono que, com a água, forma o ácido carbônico que pode decompor certos minerais primários e, ainda, os extratos de humus podem aumentar a solubilidade dos fosfatos.

FASSBENDER (1969) afirma que devido à presença de cargas eletropositivas na matéria orgânica o ion H_2PO_4 é por ela adsorvido.

AHENKORAH (1968), utilizando 17 solos de Ghana calculou correlações múltiplas entre a fixação de fosfatos e os fatores que a determinam. Este autor encontrou que para esses solos o carbono e o ferro são determinantes da fixação de acordo com a equação:

$$Y = 88,65 + 153x_{\text{C org.}} + 1,81x_{\text{\%Fe}}$$

onde:

Y é a fixação de fósforo em e.mg/100g de solo.

2.2.4. Influência do pH

Entre os fatores envolvidos, o pH do solo chega a ser tão importante que é geralmente empregado para separar em dois grupos os processos de fixação do fósforo. A calagem presta-se muito bem para comprovar o efeito do pH na disponibilidade desse elemento. MALAVOLTA et alii (1965) lembram a possibilidade da elevação do pH acarretar um aumento no teor de fósforo disponível de tal ordem que possa desaparecer, por um certo tempo, a necessidade de se aplicar fertilizantes fosfatados.

Estudos realizados em oito solos do cerrado da região do Triângulo Mineiro por BRAGA E DEFELIPO (1972), demonstraram que a calagem alterou de maneira desuniforme os teores de fósforo disponível.

Em estudo realizado por LOURENÇO (1973), em solos do Paraná, verificou-se que o calcário aumentou a adsorção máxima de fósforo. No entanto VASCONCELOS (1973), em solos do cerrado, encontrou que a adsorção máxima decresceu com o aumento do pH inicial da suspensão, sendo que num dos solos voltou a aumentar após pH 7,0.

DE DATTA et alii (1971), trabalhando com três solos do Havai verificaram que o fósforo na solução aumentava com o pH até 5,8 para um dos solos e até 6,6 para outros dois. Resultados obtidos por CABALA e FASSBENDER (1971), estudando oito solos ácidos da Bahia,

evidenciaram que a calagem diminuiu o poder de fixação até pH 5,8, havendo a partir daí aumento.

TOTH e BEAR (1947) estudando o fenômeno de fixação de fósforo em solos ácidos de New Jersey (USA) constataram que a prática da calagem resultou numa redução de 47% a 51% na retenção de fosfato.

CATANI & PELLEGRINO (1957), estudando três solos de Bauru-SP, consideraram que para os solos ácidos e com teor médio a alto em óxidos hidratados de ferro e alumínio, a causa mais importante da fixação de fósforo é a sua adsorção às partículas coloidais do solo.

O efeito da calagem sob a disponibilidade do fósforo do solo foi estudada por MELLO et alii (1976), concluíram que sendo o pH um fator que influencia a fixação do fósforo, a calagem, por sua vez, resulta no aumento de disponibilidade do fósforo do solo por reduzir-lhe a fixação e também por permitir-lhe a mineralização mais intensa.

FASSBENDER (1969), estudando a capacidade de fixação de fósforo em solos da América Central e sua relação com as características edáficas verificou que dentre as propriedades do solo como, teor de carbono, argila, hidróxidos de ferro livres, alumínio trocável e pH, o pH e o conteúdo de Fe_2O_3 são os fatores que mais afetam a fixação de fósforo.

HSU (1964), estudando solos do Canadá, considerou o material amorfo como principal fator de fixação de fósforo. Observou que quando uma solução de fosfato permaneceu por um ano em contato com solos levemente ácidos surgiu no sistema uma nova fase formada por

hidróxido fêrrico o qual retinha a maior parte do fôsforo fixado.

O pH é um fator bastante considerado e discutido na fixação de fosfato. A maioria dos autores concorda que a fixação é maior em condições elevadas de acidez ou alcalinidade.

2.2.5. Influência do alumínio trocável

Com respeito ao Al^{+3} trocável TAYLOR et alii (1975), observaram ser este ion muito ativo na precipitação de fosfato, embora REEVE & SUMNER (1970), não tenham encontrado nenhuma relação entre a capacidade de fixação dos solos estudados e o teor de Al^{+3} trocável.

SÁ et alii (1968), investigaram a influência do alumínio trocável, argila, limo, matéria orgânica, superfície específica, etc., na capacidade de retenção de fôsforo de 16 unidades de solos na zona de Pernambuco e constataram a participação do alumínio trocável na fixação do fosfato adicionado. A relação fôsforo/alumínio trocável cresceu em importância quando a concentração do alumínio era próxima ou maior do que 1,0 e.mg/100g de solo.

FASSBENDER (1969) estudou a retenção e transformação de fosfatos em oito Latossolos da Amazônia do Brasil e verificou uma fixação de 2,68% a 51,6% do fosfato adicionado. Encontrou correlação significativa entre a retenção do fôsforo e os teores de alumínio trocável ($r = 0,716$) e de matéria orgânica ($r = 0,860$).

A existência de correlação entre Al e H trocáveis, percentagem de saturação de bases, percentagem de argila e a capacidade de

fixação de fósforo foi confirmada por BROW et alii (1978). O autor não encontrou, entretanto, correlação com o ferro.

PRIMO et alii (1973) estudando a fixação de fósforo oriunda de diferentes fertilizantes concluíram que quanto maior a dose aplicada, maior era a percentagem de fósforo fixada e que nos primeiros dias após a aplicação 50% do fósforo aplicado encontrava-se na forma de fosfato de alumínio e fosfato de cálcio.

GUTNIK et alii (1967), estudando solos derivados de cinzas vulcânicas, observaram mudanças no fenômeno de fixação de fósforo devido a variação do pH. Os autores encontraram correlação entre a quantidade de fósforo fixado e o teor de alumínio trocável.

DE (1961), afirma que o processo de fixação de fosfato pode ser devido à associação do fosfato com os minerais do solo ou à remoção do fosfato da solução pela formação de compostos relativamente insolúveis de alumínio. Em meio alcalino a maior parte do alumínio tende a formar $Al(OH)_3$ ou, dependendo das condições, $AlPO_4$, explicando dessa forma porque a fixação de fosfato diminui com o aumento da alcalinidade do meio.

SYERS et alii (1971), trabalhando com 15 solos representativos do Rio Grande do Sul, também verificaram uma estreita correlação ($r = 0,84$) entre o fósforo retido e o alumínio trocável; entretanto, a remoção deste ion pouco contribuiu para a diminuição da retenção do fósforo.

FRANKLIN & RETSENAUER (1960), estudando 17 solos de Washington, constataram que a fixação de fósforo foi altamente correlacionada com o alumínio trocável e com o alumínio solúvel em ácido cítrico 0,5 M.

O fósforo forma complexos solúveis com muitos ions metálicos tais como, K, Na, Ca, Mg, Al, Fe (SILLEN e MARTEL, 1964). Como tais ions ocorrem frequentemente na solução do solo, é possível que uma boa parte do fósforo presente seja complexado (LARSEN, 1967).

A presença de Ca, Fe, Al, Mg, K, H, OH e F constitui, independentemente da fase do solo em que se encontrem, uma ameaça constante para os ions fosfatos (LANDSAY & MORENO, 1960). Coube a esses autores relacionar a atividade de cada um desses ions com a estabilidade dos respectivos compostos encontrados na fase sólida. Para eles, o produto das reações que ocorrem poderá ser ou não precipitado segundo a concentração de tais ions na solução do solo.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Materiais

Foram utilizadas 100 amostras de horizontes superficiais de solo oriundas de vários municípios do Estado de São Paulo. Essas amostras foram submetidas à análise química e granulométrica e, posteriormente ao teste de fixação de fosfato.

As amostras de solo foram cuidadosamente selecionadas de maneira a obter o maior grau de variabilidade possível dentro das condições oferecidas.

3.2. Determinação das características físicas e químicas

As características físicas e químicas dos solos utilizados no experimento estão contidas nos Quadros 1 e 2.

Quadro 1. Resultados da análise granulométrica das 100 amostras de solos

Nº da amostra	argila em água %	argila em calgon %	areia total %	limo %
1	14,7	20,9	58,3	20,8
2	13,9	23,4	56,4	20,2
3	2,4	39,4	18,7	41,9
4	18,7	33,4	47,3	19,4
5	5,8	12,8	81,9	5,3
6	5,5	14,9	79,7	5,4
7	16,4	56,9	21,0	22,1
8	17,9	41,7	43,1	15,2
9	9,0	17,8	74,7	7,5
10	4,0	48,8	32,0	19,2
11	10,9	17,7	44,8	37,5
12	4,4	7,2	88,7	4,1
13	20,1	43,6	42,4	14,0
14	26,8	48,2	36,4	15,4
15	9,2	18,4	74,0	7,6
16	16,9	25,1	48,2	26,7
17	13,6	20,0	32,1	47,9
18	10,8	19,3	36,6	44,1
19	4,7	10,8	47,4	41,8
20	6,5	19,8	50,5	29,7
21	15,9	47,7	36,6	15,7
22	29,7	50,9	21,0	28,1
23	0,2	36,2	41,7	22,1
24	5,4	8,8	48,3	42,9
25	23,9	32,8	41,2	26,0
26	20,6	36,0	26,3	47,7
27	8,8	20,0	51,0	29,0
28	24,1	37,5	22,8	39,7
29	22,7	39,4	27,3	33,3

Quadro 1. Continuação

Nº da amostra	argila em água %	argila em calgon %	areia total %	limo %
30	19,7	38,6	28,9	32,6
31	21,5	43,1	43,1	13,8
32	14,2	41,4	40,3	18,3
33	20,2	42,6	45,2	12,2
34	18,5	36,5	39,1	24,4
35	8,4	23,5	68,2	8,3
36	10,8	28,4	56,5	15,1
37	2,0	4,4	86,8	8,8
38	9,2	13,6	54,8	31,6
39	5,8	10,2	69,8	20,0
40	0,6	1,8	93,4	4,8
41	20,8	32,9	39,8	27,3
42	7,8	17,7	73,6	8,7
43	4,7	14,5	76,7	8,8
44	4,2	21,2	68,6	10,2
45	19,5	41,2	41,9	16,9
46	3,0	8,8	70,4	20,8
47	14,0	38,8	46,6	14,6
48	6,7	10,4	54,8	34,8
49	27,2	42,9	43,9	13,2
50	22,7	36,7	48,2	15,1
51	25,4	39,2	48,6	12,2
52	28,8	42,7	44,1	13,2
53	25,4	36,2	52,1	11,7
54	23,3	35,4	49,1	15,5
55	3,4	7,0	73,1	19,9
56	3,5	5,4	78,9	15,7
57	2,4	7,0	77,7	15,3
58	5,2	12,6	80,9	6,5
59	9,8	21,9	74,7	3,4

Quadro 1. Continuação

Nº da amostra	argila em água %	argila em calgon %	areia total %	limo %
60	8,4	14,4	73,6	12,0
61	7,2	16,8	66,2	17,0
62	9,6	18,9	70,0	11,1
63	9,7	17,0	69,5	13,5
64	4,9	11,5	50,2	38,3
65	7,0	11,4	82,5	6,1
66	5,2	10,6	85,7	3,7
67	5,4	11,4	81,7	6,9
68	6,2	11,8	74,4	13,8
69	4,9	7,4	64,6	28,0
70	4,0	6,3	84,1	9,6
71	3,5	6,0	83,5	10,5
72	5,4	8,8	82,6	8,6
73	5,7	9,4	79,7	10,9
74	4,4	50,3	17,9	31,8
75	15,3	25,5	23,9	50,6
76	14,1	21,9	40,8	37,3
77	8,1	14,1	30,1	55,8
78	12,0	23,9	30,4	45,7
79	8,7	25,3	62,0	12,7
80	5,7	12,3	84,9	2,8
81	6,4	8,8	83,2	8,0
82	4,2	7,5	87,8	4,7
83	5,4	8,2	83,5	8,3
84	6,4	10,6	82,5	6,9
85	5,4	8,8	74,0	17,2
86	4,6	7,3	84,0	8,7

Quadro 1. Continuação

Nº da amostra	argila em água %	argila em calgon %	areia total %	limo %
87	4,0	6,6	86,6	6,8
88	5,3	9,2	79,6	11,2
89	8,9	23,4	69,9	6,7
90	14,0	25,4	60,0	14,6
91	12,5	43,3	38,2	18,5
92	17,1	51,4	26,6	22,0
93	12,7	35,1	32,9	32,0
94	22,2	65,9	13,2	20,9
95	25,5	77,4	12,8	19,8
96	30,3	70,4	10,3	19,3
97	24,4	50,3	18,8	30,9
98	8,0	13,2	68,5	18,3
99	6,9	12,2	51,9	35,9
100	9,1	15,2	39,1	45,7

Quadro 2. Resultados da análise química das 100 amostras de solos

Amostra nº	pH Valor	Carbono %	Teor trocável em miliequivalentes/100 g de terra							Soma de Bases
			Fósforo PO_4^{-3}	Potássio K^+	Cálcio Ca^{++}	Magnésio Mg^{++}	Alumínio Al^{+++}	Hidrogênio H^+	CTC	
1	6,0	1,50	0,15	0,20	3,80	0,40	0,16	4,00	8,56	4,40
2	5,8	0,90	0,05	0,48	2,88	0,88	0,12	3,12	7,48	4,24
3	4,5	0,96	0,01	0,04	0,08	0,16	4,40	10,90	15,58	0,28
4	6,0	2,64	2,51	0,54	7,12	1,84	0,09	4,40	13,99	9,50
5	5,4	0,30	0,01	0,04	0,30	0,20	0,64	3,20	4,38	0,54
6	5,2	0,45	0,09	0,03	0,20	0,12	0,72	3,52	4,59	0,35
7	5,0	2,49	0,01	0,08	0,30	0,12	0,80	8,00	9,30	0,50
8	5,6	2,10	2,16	0,44	4,48	0,88	0,16	6,00	11,96	5,80
9	5,6	0,54	0,03	0,12	1,36	0,51	0,21	3,28	5,48	1,99
10	5,9	0,63	0,03	0,10	2,91	0,92	0,08	3,12	7,13	3,93
11	5,7	0,51	0,02	0,26	2,96	0,72	0,08	2,52	6,54	3,94
12	5,7	0,12	0,02	0,04	0,16	0,06	0,40	2,56	3,22	0,26
13	5,4	1,53	0,01	0,14	0,20	0,13	1,60	6,96	9,03	0,47
14	5,0	1,38	0,01	0,09	0,08	-	0,92	4,56	5,65	0,17
15	5,3	0,66	0,02	0,22	0,99	0,46	0,44	3,04	5,15	1,45
16	5,8	1,89	0,15	0,25	1,76	0,64	0,24	4,32	7,21	2,65
17	5,9	0,45	0,19	0,22	2,88	0,96	0,12	3,16	7,34	4,06

Quadro 2. Continuação

Amostra nº	pH Valor	Carbono %	Teor trocável em miliequivalentes/100 g de terra							Soma de Bases
			Fósforo PO_4^{-3}	Potássio K^+	Cálcio Ca^{++}	Magnésio Mg^{++}	Alumínio Al^{+++}	Hidrogênio H^+	CTC	
18	6,1	0,63	0,33	0,24	4,24	1,28	0,09	2,72	8,57	5,76
19	6,3	1,05	0,07	0,16	5,76	2,72	0,16	2,80	11,60	8,64
20	5,5	0,96	0,08	0,07	1,68	0,80	0,72	6,56	9,83	2,55
21	5,3	1,92	0,01	0,26	0,13	0,14	1,12	7,52	8,17	0,53
22	6,1	1,02	1,13	0,80	2,00	0,72	0,09	3,36	6,97	3,52
23	5,1	0,03	0,01	0,01	0,14	0,01	0,96	2,32	3,44	0,16
24	5,6	0,48	0,02	0,22	1,60	0,48	0,08	2,40	4,78	2,30
25	5,4	1,20	0,02	0,26	1,80	0,40	0,80	4,64	7,90	2,46
26	5,8	1,14	0,14	0,46	5,68	1,04	0,08	4,64	11,90	7,18
27	5,6	1,20	0,04	0,24	3,44	0,96	0,12	3,44	8,20	4,64
28	6,0	1,05	0,11	0,40	6,64	1,04	0,08	3,84	12,00	8,08
29	5,9	1,08	0,08	0,32	6,12	1,12	0,08	4,16	11,80	7,56
30	5,8	1,08	0,09	0,36	5,44	1,12	0,08	4,72	11,72	6,92
31	5,3	1,59	0,01	0,15	0,24	0,14	0,96	2,40	3,89	0,53
32	5,8	0,99	0,03	0,15	2,28	1,08	0,12	3,84	7,47	3,51
33	5,2	0,99	0,06	0,20	2,32	0,64	0,28	4,00	7,44	3,16
34	6,3	0,78	0,07	0,15	4,40	1,60	0,08	2,64	8,87	6,15

Quadro 2. Continuação

Amostra nº	pH Valor	Carbono %	Teor trocável em miliequivalentes/100 g de terra							CTC	Soma de Bases
			Fósforo	Potássio	Cálcio	Magnésio	Alumínio	Hidrogênio			
			PO_4^{-3}	K^+	Ca^{++}	Mg^{++}	Al^{+++}	H^+			
35	4,5	0,60	0,02	0,14	0,48	0,24	1,04	4,24	6,14	0,86	
36	4,9	0,72	0,02	0,19	0,72	0,16	0,72	4,16	5,95	1,07	
37	6,5	0,09	0,06	0,14	1,89	0,57	0,08	1,36	4,04	2,60	
38	6,5	0,36	0,70	0,28	2,52	0,99	0,08	2,08	5,95	3,79	
39	7,1	0,66	0,91	0,58	6,16	1,71	0,08	1,04	9,57	8,45	
40	6,2	0,00	0,02	0,01	0,08	0,00	0,06	0,52	0,67	0,09	
41	5,5	4,08	0,03	0,28	2,64	0,88	0,12	4,72	8,64	3,80	
42	6,5	1,28	0,03	0,10	1,68	1,04	0,06	1,60	4,48	2,82	
43	6,1	1,04	0,04	0,10	1,44	0,96	0,06	1,60	4,16	2,50	
44	5,7	0,21	0,01	0,11	0,40	0,32	0,80	2,88	4,51	0,83	
45	5,2	1,35	0,01	0,10	0,24	0,16	1,28	7,04	8,82	0,50	
46	6,3	0,75	0,04	0,28	2,40	0,62	0,12	1,44	4,86	3,30	
47	4,8	2,61	0,04	0,28	0,65	0,16	2,24	11,20	14,53	1,09	
48	6,3	0,63	0,04	0,42	4,00	0,70	0,08	1,76	6,96	5,12	
49	5,0	0,63	0,02	0,03	0,17	0,28	1,20	6,40	8,08	0,48	
50	4,9	1,32	0,06	0,15	0,33	0,19	1,20	6,16	8,03	0,67	
51	4,7	1,14	0,02	0,06	0,35	0,36	1,20	6,32	8,29	0,77	

Quadro 2. Continuação

Amostra nº	pH Valor	Carbono %	Teor trocável em miliequivalentes/100 g de terra								Soma de Bases
			Fósforo PO_4^{-3}	Potássio K^+	Cálcio Ca^{++}	Magnésio Mg^{++}	Alumínio Al^{+++}	Hidrogênio H^+	CTC		
52	4,8	1,48	0,03	0,08	0,57	0,25	1,20	6,40	8,50	0,90	
53	4,6	1,23	0,03	0,12	0,84	0,28	1,20	7,12	9,56	1,24	
54	5,2	1,14	0,03	0,09	0,72	0,16	0,88	5,20	7,05	0,97	
55	5,5	0,24	0,03	0,14	2,80	0,48	1,16	2,72	7,30	3,42	
56	5,1	0,21	0,08	0,08	1,36	0,24	1,20	3,36	6,24	1,68	
57	5,8	0,27	0,03	0,12	4,16	0,72	0,52	2,32	7,84	5,00	
58	5,7	0,72	0,08	0,08	2,00	1,28	0,08	2,48	5,92	3,36	
59	5,4	0,57	0,05	0,12	1,60	1,07	0,24	2,88	5,91	2,79	
60	6,1	0,66	0,02	0,18	1,84	1,12	0,09	2,72	5,95	3,14	
61	6,5	0,69	0,01	0,14	2,16	1,68	0,08	2,32	6,38	3,98	
62	6,5	0,66	0,01	0,12	1,32	1,07	0,12	2,40	5,03	2,51	
63	5,3	0,57	0,15	0,12	1,40	1,63	0,12	2,64	5,91	3,15	
64	5,3	2,24	0,09	0,04	0,16	0,08	0,96	4,00	5,24	0,28	
65	5,6	1,78	0,16	0,04	0,24	0,08	0,60	3,72	4,68	0,36	
66	5,10	2,50	0,03	0,03	0,24	0,16	0,92	4,24	5,59	0,43	
67	5,20	2,50	0,03	0,03	0,12	0,11	1,04	4,48	5,78	0,26	
68	5,20	2,59	0,14	0,03	0,11	0,03	1,04	4,48	5,69	0,17	

Quadro 2. Continuação

Amostra nº	pH Valor	Carbono %	Teor trocável em miliequivalentes/100 g de terra								Soma de Bases
			Fósforo PO_4^{-3}	Potássio K^+	Cálcio Ca^{++}	Magnésio Mg^{++}	Alumínio Al^{+++}	Hidrogênio H^+	CTC		
69	6,3	0,27	0,03	0,28	1,20	0,27	0,16	2,32	4,23	1,75	
70	6,0	0,30	0,07	0,26	1,04	0,64	0,16	2,08	4,18	1,94	
71	5,6	0,27	0,81	0,24	2,32	0,80	0,20	2,48	6,04	3,36	
72	5,4	0,30	0,20	0,20	0,56	0,24	1,28	2,88	5,16	1,00	
73	5,4	0,24	0,04	0,26	1,12	0,56	0,80	2,72	5,46	1,94	
74	6,3	1,35	0,06	0,70	4,08	2,64	0,24	4,96	12,62	7,42	
75	5,0	1,20	0,18	0,76	3,84	1,44	0,48	5,68	12,20	6,04	
76	5,7	1,08	0,27	0,13	3,12	1,28	0,16	4,00	8,69	4,53	
77	7,4	2,79	0,04	0,07	8,40	4,24	0,16	1,60	14,47	12,71	
78	6,5	1,05	0,76	0,82	4,80	1,52	0,08	3,52	10,74	7,14	
79	5,5	1,20	0,01	0,12	2,56	0,64	0,64	5,04	9,00	3,32	
80	5,6	0,39	0,02	0,06	0,40	0,16	0,56	3,04	4,22	0,62	
81	6,0	0,21	0,14	0,10	1,36	0,40	0,08	2,08	4,02	1,86	
82	6,0	0,24	0,06	0,30	0,80	0,64	0,20	1,84	3,78	1,74	
83	6,3	0,30	0,12	0,50	1,44	0,72	0,16	1,84	4,66	2,66	
84	5,5	0,39	0,05	0,12	0,64	0,24	0,88	3,36	5,24	1,00	
85	5,9	0,48	0,04	0,25	2,40	1,28	0,32	3,36	7,61	3,93	

Quadro 2. Continuação

Amostra nº	pH Valor	Carbono %	Teor trocável em miliequivalentes/100 g de terra							Soma de Bases	
			Fósforo PO_4^{-3}	Potássio K^+	Cálcio Ca^{++}	Magnésio Mg^{++}	Alumínio Al^{+++}	Hidrogênio H^+	CTC		
86	5,7	0,39	0,04	0,20	1,92	0,64	0,64	0,64	3,12	6,52	2,76
87	6,2	0,27	0,04	0,34	0,88	0,72	0,16	0,16	2,08	4,18	1,94
88	6,2	0,42	0,11	0,56	0,75	0,60	0,32	0,32	2,56	4,79	1,91
89	6,9	0,75	0,06	0,06	2,10	0,92	0,08	0,08	1,95	5,11	3,08
90	5,6	0,87	0,17	0,10	1,00	0,27	1,50	1,50	4,80	7,67	1,37
91	5,1	1,50	0,05	0,08	0,72	0,56	1,60	1,60	9,20	12,16	1,36
92	4,9	1,89	0,03	0,10	0,80	0,40	2,32	2,32	12,00	15,62	1,30
93	5,2	1,98	0,02	0,25	1,00	0,51	1,84	1,84	10,96	14,56	1,76
94	5,5	1,38	0,04	0,15	3,84	1,56	0,36	0,36	5,44	11,35	5,55
95	5,2	1,35	0,04	0,11	3,28	0,88	0,88	0,88	6,16	11,31	4,27
96	5,1	1,35	0,03	0,09	2,24	1,00	1,20	1,20	6,40	10,93	3,33
97	5,4	1,47	0,06	0,54	3,52	1,40	0,40	0,40	4,80	10,66	5,46
98	6,0	0,51	0,15	0,80	2,00	0,72	0,16	0,16	2,40	6,08	3,52
99	6,3	0,57	0,56	1,44	2,67	0,84	0,08	0,08	2,00	7,03	4,95
100	5,9	0,51	0,23	0,72	2,64	1,00	0,20	0,20	2,64	7,20	4,36

Os métodos analíticos empregados foram os seguintes.

3.2.1. Caracterização física

A análise granulométrica foi executada seguindo o Método da Pipeta, MARCOS (1972). A dispersão foi feita com calgon (hexametafosfato de sódio) a 5%.

Determinou-se a porcentagem de argila em água e com dispersante, areia total e limo.

Os resultados da análise granulométrica das 100 amostras de solos encontram-se no Quadro 1.

3.2.2. Caracterização química

3.2.2.1. Determinação do pH

A determinação do pH em água foi feita eletrometricamente utilizando suspensão de solo em água, na proporção solo-água de 1:2.

3.2.2.2. Determinação do alumínio trocável

Na determinação do alumínio trocável usou-se como extrator o cloreto de potássio, 1N, e titulou-se com hidróxido de sódio usando-se como indicador solução de fenolftaleína.

3.2.2.3. Determinação do carbono

Determinou-se o carbono fazendo-se a oxidação da matéria orgânica com dicromato de potássio e titulando-se o excesso de oxidante com a solução de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$.

3.2.2.4. Determinação do fósforo solúvel em ácido sulfúrico 0,05N

Determinou-se o fósforo pelo complexo fosfo-sulfomolibdico, usando como redutor cloreto estanhoso e efetuando-se a leitura em filtro de 660 milimicrons.

3.2.2.5. Determinação do potássio trocável do solo por fotometria de chama

O potássio foi extraído usando HNO_3 0,05N. Ao extrato foi adicionado solução de fenolftaleína a 1% e efetuada a neutralização com NH_4OH até a viragem do indicador. O teor foi avaliado por fotometria de chama.

3.2.2.6. Determinação do cálcio e do magnésio trocáveis no solo

O cálcio e o magnésio foram determinados pelo método do EDTA (ácido etileno diamino tetraacético). Para o cálcio o indicador foi o metalo crômico calgon.

Para o cálcio junto com o magnésio o indicador foi o erio-cromo preto T.

Os resultados da análise química das 100 amostras de solo encontram-se no Quadro 2.

3.3. Determinação da capacidade de fixação de fosfato pelo solo

3.3.1. Marcha de determinação

Transferiu-se 4g de terra para frasco de Erlenmeyer de 250 ml e adicionou-se 100 ml da solução aquosa 0,001N em PO_4^{-3} proveniente do KH_2PO_4 . Arrolhou-se o vaso e agitou-se em agitador horizontal durante 15 minutos sendo então efetuada filtragem em papel filtro qualitativo.

Foram transferidas alíquotas de 2 ml do extrato e da solução 0,001N em PO_4^{-3} para balões volumétricos de 50 ml.

Adicionou-se a cada balão 1,5 ml da solução de H_2SO_4 5N, 2,5 ml do reativo sulfomolibdico e 0,5 ml da solução de cloreto estanhoso a 2%, homogeneizando-se após a adição de cada reativo.

Completo-se o volume dos balões com água destilada, agitando-se e após 10 minutos procedeu-se a leitura em colorímetro fotoelétrico, empregando-se filtro de 660 milimicrons.

3.3.2. Cálculo da porcentagem de fosfato fixada

A porcentagem de PO_4^{-3} fixada foi calculada pela seguinte fórmula:

$$\text{Fixação porcentual de } \text{PO}_4^{-3} = 100 - \frac{100 - L_2}{L_1}$$

sendo:

L_2 - número de e.mg de PO_4^{-3} em 100ml de solução 0,001N em PO_4^{-3}

L_1 - número de e.mg de PO_4^{-3} de solução que foi agitada com o solo.

Procurou-se obter correlações entre as quantidades de fosfato fixada (em porcentagem) e as características químicas e físicas das mesmas.

Os resultados foram analisados estatisticamente através do emprego da análise de regressão linear simples e de análise de regressão linear múltipla.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados do teste de fixação de fosfatos das 100 amostras de solo são apresentados no Quadro 3.

As correlações lineares simples entre a porcentagem de fósforo fixado pelas 100 amostras de solo e as características física e química dos solos estudados são apresentados no Quadro 4.

Quadro 3. Resultados do ensaio de fixação de fosfato

Amostra nº	Porcentagem de fixação	Porcentagem calculada por regressão
1	15,1	15,8
2	22,6	21,8
3	54,8	63,8
4	30,3	28,9
5	6,2	13,8
6	13,0	15,5
7	52,1	51,8
8	34,9	36,3
9	13,0	15,4
10	62,3	48,2
11	13,0	16,6
12	4,8	6,9
13	33,5	45,5
14	32,8	46,4
15	22,6	17,9
16	14,4	19,9
17	8,9	20,3
18	10,9	19,9
19	14,4	15,3
20	14,4	21,0
21	40,1	45,6
22	47,6	48,3

Quadro 3. Continuação

Amostra nº	Porcentagem de fixação	Porcentagem calculada por regressão
23	43,8	39,4
24	5,4	7,0
25	30,3	32,3
26	34,9	34,1
27	24,6	17,6
28	47,6	35,5
29	47,9	37,8
30	41,8	37,0
31	45,2	41,3
32	58,9	40,3
33	36,9	40,8
34	45,2	37,6
35	23,3	25,8
36	43,8	28,2
37	2,9	4,2
38	10,9	13,9
39	10,9	12,7
40	1,4	1,9
41	17,8	20,3
42	11,6	15,0
43	6,2	12,0
44	15,7	23,8
45	34,2	41,9
46	4,1	6,7
47	34,9	47,4

Quadro 3. Continuação

Amostra nº	Porcentagem de fixação	Porcentagem calculada por regressão
48	4,8	8,9
49	53,4	46,2
50	35,6	37,2
51	43,2	41,1
52	45,9	43,0
53	37,7	37,4
54	39,7	34,7
55	11,6	12,1
56	15,7	9,9
57	5,5	9,2
58	14,4	12,8
59	20,5	22,8
60	24,7	14,3
61	28,1	18,5
62	20,5	18,8
63	22,6	19,2
64	10,2	7,1
65	9,5	6,6
66	4,1	5,3
67	8,9	6,6
68	7,5	6,4
69	3,4	6,1
70	2,1	6,2
71	4,8	6,7
72	15,7	13,5
73	12,3	12,7
74	56,8	54,2

Quadro 3. Continuação

Amostra nº	Porcentagem de fixação	Porcentagem calculada por regressão
75	26,0	26,9
76	19,2	21,4
77	15,7	17,9
78	18,4	23,8
79	29,4	26,1
80	10,9	12,7
81	2,7	8,4
82	15,6	9,1
83	15,8	9,7
84	20,5	13,2
85	19,9	13,7
86	8,2	9,4
87	4,1	6,8
88	10,2	9,3
89	15,7	22,2
90	27,4	30,4
91	55,5	46,8
92	56,8	57,4
93	58,2	38,0
94	63,7	64,2
95	65,7	68,7
96	71,9	73,6
97	47,9	50,2
98	10,3	12,5
99	8,9	11,4
100	10,9	15,8

Quadro 4. Correlação entre a porcentagem de fósforo fixado e as características do solo consideradas

Característica do solo	Coefficiente de correlação	Teste T
pH	-0,4215	4,60**
% de carbono	0,3122	3,25**
P trocável	-0,0265	0,26ns
Ca trocável	0,0692	0,68ns
Mg trocável	0,0448	0,44ns
Al trocável	0,3886	4,17**
C.T.C.	0,5766	6,98**
Soma de bases	0,0247	0,24ns
Argila em água	0,6484	8,43**
Argila em calgon	0,9000	20,44**
Areia total	-0,7335	10,78**
Limo	0,1352	1,35ns

4.1. Influência do pH na porcentagem de fosfato fixado

Como pode ser visto no Quadro 4, foi encontrada correlação negativa entre o pH e a porcentagem de fósforo fixado pelas 100 amostras de solo estudadas, com significância a nível de 1% de probabilidade pelo Teste T. À medida que se eleva o pH das amostras utilizadas, diminui a capacidade de fixação de fosfato pelo solo. Isto pode ser devido ao maior teor de Fe e Al livres encontrados nos solos ácidos. Em faixas de pH mais elevadas participariam do fenômeno de fixação as partículas de argila e, finalmente em solos alcalinos, os fosfatos podem ser precipitados por cations divalentes como Ca^{++} e Mg^{++} .

Trabalhos de MALAVOLTA et alii (1965), BRAGA e DEFELIPO (1972), TOTH e BEAR (1947), confirmam a influência positiva do aumento do pH sobre a disponibilidade de fósforo no solo. Todos são unânimes em afirmar a importância da calagem, ou da elevação do pH, na diminuição da fixação de fosfatos pelo solo.

4.2. Influência da % de carbono na porcentagem de fixação de fosfato

Foi encontrada correlação positiva a nível de 1% de probabilidade pelo Teste T entre a porcentagem de fixação de fosfato e a porcentagem de carbono das 100 amostras de solo.

Esses resultados estão de acordo com alguns autores como LEAL (1971), AHENKORAH (1968), RODRIGUES e SANCHEZ (1968) que concluíram que a matéria orgânica aumenta a capacidade de fixação de fósforo; outros autores, entretanto, evidenciam o efeito benéfico da matéria orgânica

sobre o conteúdo de fósforo disponível; entre eles estão TISDALE e NELSON (1970) e BHAT e BOYER (1968). BUCKMAN & BRADY (1968), seguindo essa última corrente, explica que a associação dos produtos da decomposição da matéria orgânica tais como ácidos orgânicos e humus com o ferro e alumínio formando complexos, inativaria os últimos reduzindo acentuadamente a fixação do fósforo inorgânico. Por outro lado FASSBENDER (1969) afirma que devido à presença de cargas eletropositivas na matéria orgânica o ion H_2PO_4 é por ela adsorvido.

Há, portanto, uma certa controvérsia entre os autores a respeito da influência da matéria orgânica sobre a fixação de fósforo pelo solo.

4.3. Influência do P solúvel na capacidade de fixação de fosfatos

Não foi encontrada correlação significativa entre o conteúdo de P trocável e a capacidade de fixação de fosfato. Pode ser considerado um efeito negativo, apesar de estatisticamente não significativo. Um maior conteúdo de P inicial no solo poderia acarretar uma menor fixação.

4.4. Influência do Ca e Mg trocáveis sobre a capacidade de fixação de fosfatos

No caso do Ca e Mg não foi encontrada correlação significativa entre os seus respectivos teores no solo e a porcentagem de fixação de fosfatos, quando se considerou o efeito isolado dessas características químicas. Entretanto, autores como ALLISON (1943), CALVERT et alii

(1960) RAGLAND e SEAY (1957), RACZ e SOPER (1970), evidenciaram a influência do cálcio e do Mg na fixação de fosfatos devido a esses elementos formarem compostos de solubilidade variável com o fósforo.

Comparando-se os resultados da análise química das 100 amostras de solo (Quadro 2) com os resultados de fixação (Quadro 3) pode-se notar que algumas amostras de solo, apesar de apresentarem teores relativamente altos de Ca e Mg trocáveis não apresentam pH favorável para que haja precipitação do ion fosfato por aqueles cations. BRADFIELD et alii (1935) estabeleceram a faixa de pH na qual esse fenômeno ocorre como sendo de 6,0 a 10. Pode-se notar, pelos dados de pH apresentados no quadro 2, que os solos estudados são, na sua grande maioria, ácidos.

4.5. Influência do Al^{+3} trocável sobre a capacidade de fixação de fosfatos

Ao se considerar o efeito isolado do Al^{+3} trocável sobre a porcentagem de fosfato fixado pelas 100 amostras encontrou-se correlação positiva a nível de 1% de probabilidade pelo Teste T. Isto pode ser devido a formação de compostos relativamente insolúveis de fosfato de Alumínio. Autores como FASSBENDER (1969), FRANKLIN e RETSENAUER (1960) confirmam haver correlação significativa entre o teor de Al trocável e a capacidade de fixação de fosfatos pelo solo. DE (1961) salienta que em meio alcalino a maior parte do alumínio tende a formar $Al(OH)_3$ ou dependendo das condições $AlPO_4$, explicando dessa forma porque a fixação de fosfato diminui com o aumento da alcalinidade do meio.

4.6. Influência da capacidade de troca de cations (C.T.C.) sobre a capacidade de fixação de fosfatos

No presente trabalho a autora encontrou correlação positiva significativa a nível de 1% de probabilidade entre a capacidade de fixação de fosfatos e a CTC do solo. Uma explicação desse fenômeno seria o fato de que solos com maior CTC, apresentam maiores teores de argila e matéria orgânica, fatores que influem significativamente a capacidade de fixação de fosfatos.

4.7. Influência da soma de bases trocáveis na capacidade de fixação de fosfatos

Não foi encontrada correlação significativa entre soma de bases trocáveis e a capacidade de fixação de fosfatos.

4.8. Influência do teor de argila na capacidade de fixação de fosfatos

O conteúdo de argila influenciou significativamente a capacidade de fixação de fosfatos pelo solo havendo correlação positiva a nível de 1% de probabilidade pelo Teste T. Resultados semelhantes foram obtidos por ANASTÁCIO (1968), JUO e FOX (1977), MELLO (1968).

Explicações a esse fenômeno são dadas por COLLEMAN (1944) salientando que a fixação de fosfatos é devida à troca aniônica entre os ions fosfatos e as oxidrilas do capeamento de luceroxidas livres de ferro e alumínio dificilmente removíveis das argilas.

Comparando-se os resultados da análise granulométrica das 100 amostras do solo (Quadro 1) com os resultados de fixação de fosfatos (Quadro 3) pode-se notar que alguns solos com alto teor de argila fixaram pouco fósforo; o contrário também ocorreu. HALL e BEKER (1971) salientam a importância do tipo de argila na fixação de fosfatos. COLE e JACKSON (1950) evidenciam que dentre os argilo-minerais, os do grupo da vermiculita parecem apresentar maior poder de fixação. Além disso, também o pH tem influência no comportamento desses minerais. Esses fenômenos poderiam explicar, até certo ponto, algumas discrepâncias nos resultados obtidos. É interessante salientar que no presente estudo utilizou-se apenas a porcentagem de argila contida em cada amostra.

4.9. Influência do teor de Areia Total na capacidade de fixação de fosfato

Como pode ser visto no quadro 4 o teor de areia das amostras de solos estudados influenciou significativamente a capacidade de fixação de fosfato pelo solo. Foi encontrada correlação negativa a nível de 1% de probabilidade, resultado já esperado, uma vez que apenas as frações mais finas do solo têm maior capacidade de fixação de fosfato. À medida que o teor de areia total se eleva diminui a fixação.

4.10. Influência do teor de limo na capacidade de fixação de fosfato

Não foi encontrada correlação entre a capacidade de fixação de fosfato e o teor de limo das amostras de solos, discordando de

autores como MELLO (1968) que encontrou correlação entre essas características.

4.11. Correlação linear múltipla entre a capacidade de fixação de fósforo e as características do solo estudadas

Além da análise de regressão linear simples, na qual é verificado o efeito isolado de cada característica estudada sobre a fixação de fósforo, os resultados foram submetidos também à análise de regressão múltipla pelo processo de BACKWARD ELIMINATION. Por esse método busca-se encontrar a melhor equação de regressão para a porcentagem de fósforo fixada e as demais variáveis consideradas, ou seja, na equação são incluídas apenas as variáveis que influem significativamente, a nível de 5% de probabilidade, na porcentagem de fixação de fósforo, dentro do contexto geral de todas as variáveis.

A ordem de posterior discussão é dada a ordem de eliminação das variáveis não incluídas na equação, salientando-se que a primeira variável eliminada é a que menor efeito tem sobre o processo de fixação.

A ordem de eliminação foi a seguinte: areia total, C.T.C. soma de bases, argila em água, pH, Ca, limo, fósforo trocável.

A análise de variância final é apresentada no Quadro 5.

Quadro 5. Análise de variância final de regressão linear múltipla para Y (% de fósforo fixado) e as variáveis selecionadas X₂ (% de carbono) X₄ (Mg⁺⁺ trocável) e X₅ (Al⁺³ trocável) e X₉ (% de argila)

Causas de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	4	27468,09043	6867,022609	131,515**
Desvio regressão	95	4922,932407	51,82034114	
Total	99	32391,0228		

A equação de regressão linear múltipla obtida por esse processo foi a seguinte:

$$Y = -2,266 - 3,484 \frac{\%C}{\%C} + 3,514 \frac{Mg}{Mg} + 5,559 \frac{Al}{Al} + 1,005 \frac{\% \text{ argila calgon}}{\% \text{ argila calgon}}$$

onde:

Y = porcentagem de fosfato fixado pela amostra de solo considerado.

O coeficiente de determinação foi de 84,8%. Como pode ser visto as variáveis selecionadas foram: porcentagem de carbono, teor de Al⁺³ trocável, teor de Mg⁺² trocável e porcentagem de argila em calagem.

O teor de Mg⁺² trocável aparece agora como uma das variáveis que unida as demais selecionadas melhor exprime a capacidade de fixação de fosfato pelo solo; entretanto, quando se considerou o efeito

isolado desse elemento não houve correlação significativa com a porcentagem de fosfato fixado. Isto evidencia a influência conjunta de várias características do solo, interdependentes, sobre o processo de fixação.

Por outro lado, características que isoladamente tiveram efeito significativo, quando analisadas em conjunto, não exprimiram o mesmo efeito.

Com respeito a ordem de eliminação pode-se observar que a porcentagem de areia total foi a característica de menor efeito sobre a capacidade de fixação de fosfato. O teor de fósforo trocável foi a última característica a ser eliminada no processo de fixação quando comparada com as demais características anteriormente eliminadas.

Analizando-se ainda a equação de regressão linear múltipla obtida nota-se que a variável de maior influência no resultado obtido com a utilização dessa equação é a porcentagem de argila, em outras palavras, essa foi a variável que mais influenciou o processo.

A partir dessa equação de fixação, foram obtidos valores estimados da porcentagem de fosfato fixado pelas 100 amostras de solo utilizadas. Esses valores foram anexados ao Quadro 3 com a finalidade de facilitar a comparação com os resultados de fixação obtidos em laboratório.

Pode-se observar neste Quadro que os valores estimados apresentam razoável aproximação aos valores observados, o que permite dizer que as características do solo, porcentagem de carbono, teor de Mg^{+2} trocável, teor de Al^{+3} trocável e a porcentagem de argila são características razoavelmente seguras para se estimar a capacidade de fixação de fosfatos para os solos utilizados.

5. CONCLUSÕES

Para as condições em que foi realizado este trabalho e com base na análise estatística dos resultados experimentais conclui-se que:

1. Com base na análise de regressão linear simples as características do solo que afetaram significativamente a capacidade de fixação de fosfato dos solos do Estado de São Paulo foram: % de carbono, teor de Al^{+3} trocável, CTC, % de argila, pH e % de areia.
2. Com base na análise de regressão linear múltipla as características que mais influenciaram a capacidade de fixação de fosfato dos solos do Estado de São Paulo foram: % de carbono, Mg^{+2} trocável, Al^{+3} trocável e % de argila.
3. A equação que melhor exprime o fenômeno de fixação de fosfatos para solos do Estado de São Paulo pode ser assim expressa:

$$Y = -2,266 - 3,484 \text{ \%C} + 3,514 \text{ Mg}^{+2} \text{ trocável} + 5,559 \text{ Al}^{+3} \text{ trocável} + 1,005 \text{ \% argila}$$

4. Em estudos relacionados com fixação de fosfatos pelo solo é interessante levar-se em consideração o efeito conjunto das características físicas e químicas do solo sobre o processo.

SUMMARY

A laboratory experiment was done to verify the effect of soil chemical and physical characteristics on the phosphate fixing capacity of soils occurring in the State of São Paulo.

One hundred samples collected from various localities were at first characterized chemically and their particle size distribution determined. They were then tested as to their phosphate fixing capacities.

The results obtained were statistically analyzed by means of both linear simple and multiple correlation. The following conclusions could be drawn:

1. Simple linear regression analysis indicated that % C, exchangeable Al^{+3} , CEC, clay %, pH and sand % were the soil characteristics which significantly affected phosphate fixing capacity of São Paulo State Soils.
2. Multiple linear regression analysis indicated that % C, exchangeable Mg^{+2} , exchangeable Al^{+3} and clay % were

the soil characteristics which significantly affected phosphate fixing capacity of São Paulo State Soils.

3. Phosphate fixing phenomena as it occurs in the soils of São Paulo can be best described by the following equation:

$$Y = -2.266 - 3.484 \frac{\%C}{\text{exch.}} + 3.514 \frac{\text{Mg}^{+2}}{\text{exch.}} + 5.559 \frac{\text{Al}^{+3}}{\text{exch.}} + 1.005 \% \text{ clay}$$

4. Phosphate fixation in the soil is affected by the combined effects of both soil chemical and physical characteristics.

LITERATURA CITADA

AHENKORAH, Y., 1968. Phosphorus retention capacities of some cacao-growing soils in Ghana and their relationships with soil properties. Soil Science, Baltimore, 105(1):24-30.

ALLISON, L.E., 1943. The trend of phosphate adsorption by inorganic colloids from certain Indiana soils. Soil Science, Baltimore, 55: 333-342.

ANASTÁCIO, M. de L.A., 1968. Fixação de fósforo nos solos brasileiros. Boletim técnico da Equipe de Pedologia e Fertilidade do Solo, Rio de Janeiro, n. 4, 14 p.

BASS, G.B. e H.D. SHIELING, 1950. Method for determining relative phosphate-fixing capacity of acid soils. Soil Science, Baltimore, 69:269-280.

- BRADFIELD, R.; G. SCARSETH e J.G. STEELE, 1935. Factors affecting the retention of phosphate by clays. In: 3. International Congress of Soil Science, Oxford, v.1. p.74-75.
- BRAGA, J.M. e B.V. DEFELIPO, 1972. Relações entre formas de fósforo disponível e material vegetal em solos sob vegetação de cerrado. I. Trabalho de Laboratório. Revista Ceres, Viçosa, 19(102):124-126.
- BROWN, H.G. e H. LOEWENSTEIN, 1978. Relationship of soil properties to P-fixing capacity of soils in Northern Idaho. Communications in Soil Science and Plant Analysis, New York, 9(7):571-581.
- BUCKMAN, H.O. e N.C. BRADY, 1967. Natureza e propriedades dos solos. Trad. A.B.N. Figueiredo. Rio de Janeiro, USAID, 594p.
- CABALLA, R.P. e H.W. FASSBENDER, 1971. Efecto del encanado en las formas y disponibilidad de fosfatos en suelos de la región cacaotera, Bahia, Brasil. Turrialba, 21:38-46.
- CALVERT, D.V.; H.F. MASSEY e W.A. SEAY, 1960. The effect of exchangeable calcium on the retention of phosphorus by clay fractions of soils of the Memphis Catena. Proceedings of Soil Science Society of America, Madison, 24:333-335.

CATANI, R.A., 1947. Contribuição ao estudo dos fosfatos, sua dosagem, extração e distribuição nos solos do Estado de São Paulo. Piracicaba, ESALQ/USP, 65p (Tese de doutoramento).

CATANI, R.A. e D. PELLEGRINO, 1957. A fixação de fósforo em alguns solos do Estado de São Paulo, estudada com o auxílio do fósforo radioativo $^{32}\text{P}_{15}$. Revista de Agricultura, Piracicaba, 32(4):237-252.

CATANI, R.A. e D. PELEGRINO, 1960. Avaliação da capacidade de fixação de fósforo pelo solo. Anais da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 17:19-28.

COLE, C.V. e M.L. JACKSON, 1950. Solubility equilibrium constant of dihydroxy-phosphate relating to a mechanism of phosphate fixation in soils. Proceedings of Soil Science Society of America, Madison, 15:84-88.

COLEMAN, R., 1944. The mechanism of phosphate fixation by montmorillonitic and kaolinitic clays. Proceedings of Soil Science Society of America, Madison, 9:72-78.

DE, S.K., 1961. Adsorption of phosphate ion by hydrogen derivative of Indian montmorillonite (Kashmir bendolite) Soil Science, Baltimore, 92:117-119.

- DE DATTA, S.K.; R.L. FOX e G.D. SHERMAN, 1963. Availability of fertilizer phosphorus in three latossols of Hawaii. Agronomy Journal, Madison, 55(4):311-313.
- ELLIS Jr., R. e E. TRUOG, 1955. Phosphate fixation by montmorillonite. Proceedings of Soil Science Society of America, Madison, 19(4):451-454.
- FASSBENDER, H.W., 1966. La adsorción de fosfatos en suelos fuertemente ácidos y su evolución usando la isoterma de Langmuir. Fitotecnia Latinoamericana, San José, 3(1/2):203-216.
- FASSBENDER, H.W., 1969. Estudio del fósforo en suelos de América Central. IV. Capacidad de fijación de fósforo y su relación con características edáficas. Turrialba, 19:497-505.
- FASSBENDER, H.W., 1969. Phosphorus fixation in tropical soils. Agridigest, Bruselas, n. 18.
- FASSBENDER, H.W., 1969. Retención y transformación de fosfatos en 8 latosolos de la Amazonia del Brasil. Fitotecnia Latinoamericana, San José, 6(1):115-126.
- FRANKLIN, W.T. e H.M. RETSENAUER, 1960. Chemical characteristics of soil related to phosphorus fixation and availability. Soil Science, Baltimore, 90:192-200.

- GUTNIK, V.; J. BALCAR; H. BEHRENS e E. ACEVEDO, 1967. Influencia del pH sobre la fijación del fósforo en suelos derivados de cenizas volcánicas. Agricultura Técnica, Santiago de Chile, 27(4):141-143.
- HALL, J.K. e D.E. BAKER, 1971. Phosphorus fixation by montmorillonitic and vermiculite clays as influenced by pH and soluble aluminum. Proceedings of Soil Science Society of America, Madison, 35:876-881.
- HEMWALL, J.B., 1957. The fixation of phosphorus by soils. Advances in Agronomy, Palo Alto, 9:95-111.
- HSU, P.H., 1964. Adsorption of phosphate by aluminum and iron in soils. Proceedings of Soil Science of America, Madison, 28(4):474-478.
- HUFFMAN, E.O., 1962. Reaction of phosphate in soil; recent research by TVA. Proceedings of the Fertility Society of London, 75:5-35.
- JUO, A.S.R. e R.L. FOX, 1977. Phosphate sorption characteristics of some Bench-Mark soils of West Africa. Soil Science Baltimore, 124(6): 370-376.
- KARDOS, L.T., 1969. Soil fixation of plant nutrients in: BEAR, F.E. ed. Chemistry of the soil. 2.ed. New York, Van Nostrand, p.369-394.
- LARSEN, S., 1967. Soil phosphorus. Advances in Agronomy, Palo Alto, 19:151-210.

LEAL, J.R., 1971. Adsorção de fosfato em latossolos sob cerrado. Rio de Janeiro, UFRRJ, 96p. (Tese de mestrado).

LINDSAY, W.L.; A.W. FRAZIER e H.F. STEPHENSON, 1962. Identification of reaction products from phosphate fertilizer in soil. Proceedings of Soil Science Society of America, Madison, 26:446-452.

LINDSAY, W.L. e E.C. MORENO, 1960. Phosphate phase equilibria in soils. Proceedings of Soil Science Society of America, Madison, 24(5):117-182.

LOURENÇO, S., 1973. Adsorção e dessorção de fósforo em solos do estado do Paraná. Piracicaba, ESALQ/USP, 68p. (Tese de doutoramento).

MALAVOLTA, E.; O.J. CRÓCOMO; R.G. De ANDRADE; C. ALVIZURI; R. VENCovsky e L.M.M. FREITAS, 1965. Estudos sobre a fertilidade dos solos do cerrado. I. Efeito da calagem na disponibilidade do fósforo (Nota prévia). Anais da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Piracicaba, 22:131-138.

MELLO, F.A.F., 1968. Capacidade de fixação de fosfato de alguns solos do município de Piracicaba. Revista de Agricultura, Piracicaba, 43: 23-27.

- MELLO, F.A.F. e F.J.A. CAVALCANTI, 1976. O emprego do método de Mitscherlich na avaliação do efeito da calagem sobre a disponibilidade do fósforo do solo. Revista da Agricultura, Piracicaba, 51(1):23-25.
- MENDES, C.T., 1950. Adubações fosfatadas. Revista de Agricultura, Piracicaba, 25(1/2):1-22.
- MILLAR, C.E., 1955. Soil Fertility. London, Chapman, 436p.
- PRIMO, E.; J.M. SALA e R. SOLA, 1973. Estudio de la fijación del fósforo biamónico en un suelo calizo de la región valenciana. Revista de Agroquímica y Tecnología de Alimentos, Valencia, 13(2):259-264.
- RACZ, G.J. e R.J. SOPER, 1967. Reaction products of orthophosphates in soils containing varying amounts of calcium and magnesium. Canadian Journal of Soil Science. Ottawa, 48:265-269.
- RAGLAND, J.L. e W.A. SEAY, 1957. The effects of exchangeable calcium on the retention and fixation of phosphorus by clay fractions of soil. Proceedings of Soil Science Society of America, Madison, 21:261-264.
- REEVE, N.G. e M.E. SUMMER, 1970. Effects of aluminum toxicity and phosphorus fixation on crop growth on Oxisols in Natal. Proceedings of Soil Science Society of America, Madison, 34(2):263-267.

RODRIGUES, O. e C. SANCHEZ, 1968. Fijación del fósforo por cuatro tipos de suelos de Sabana. Oriente Agropecuario, Monagas, 1(1):23-33.

SÁ JUNIOR, P.M.; I.F. GOMES e A.L. VASCONCELOS, 1968. Retenção de fósforo em solos da zona de Mata de Pernambuco. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Rio de Janeiro, 3:183-188.

SAUCHELLI, V., 1965. Phosphates in agriculture. New York, Reinhold, 277p.

SILLEN, L.G. e A.E. MARTEL, 1964. Stability constants of metal-iron complexes. Special Publication of Chemical Society, London, n.17.

STRONG, J. e G.J. RACZ, 1970. Reaction products of applied orthophosphate in some Manitoba soils as affected by soil calcium and magnesium content and time of incubation. Soil Science, Baltimore, 110:258-262.

SYERS, J.K.; J.T. EVANS; J.D.H. WILLIAMS, e J.T. MURDOCK, 1971. Phosphate sorption parameters of representative soils from Rio Grande do Sul, Brasil. Soil Science, Baltimore, 112(4):267-275.

TAYLOR, A.W. et alii, 1965. Precipitation of phosphate from ammonium phosphate solutions by iron and aluminum hydroxide. Proceedings of Soil Science, Society of America, Madison, 29:317-320.

- TISDALE, S.L. e W.L. NELSON, 1965. Soil Fertility and Fertilizers. New York, MacMillan, 430p.
- TISDALE, S.L. e W.L. NELSON, 1970. Soil Fertility and Fertilizers. 2.ed. New York, MacMillan, 694p.
- TOTH, S.J. e F. BEAR, 1947. Phosphorus adsorbing capacities of some New Jersey soils. Soil Science, Baltimore, 64:199-211.
- VASCONCELOS, C.A., 1973. Contribuição para o estudo de fósforo em dois latossolos do Estado de Mato Grosso. Viçosa, UFV, 103p. (Tese de M.S.).