

JEFERSON ANTÔNIO DE SOUZA

RELAÇÕES ENTRE FORMAS DE FERRO E SORÇÃO DE
FÓSFORO EM LATOSSOLOS SOB CERRADO
DO PLANALTO CENTRAL

Dissertação apresentada à Escola Superior de Agricultura de Lavras, como parte das exigências do curso de mestrado em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do grau de MESTRE.

ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA DE LAVRAS

LAVRAS - MINAS GERAIS

1 9 8 5

RELAÇÕES ENTRE FORMAS DE FERRO E SORÇÃO DE FÓSFORO EM LATOSSOLOS
SOB CERRADO DO PLANALTO CENTRAL

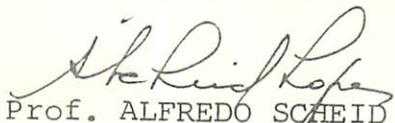
APROVADA:



Prof. NILTON CURI

Orientador

Prof. GERALDO APARECIDO DE AQUINÒ GUEDES



Prof. ALFREDO SCHEID LOPES



Prof. MAURO RESENDE

Ao meu pai "in memórian"

À minha mãe pelo esforço e empenho a
mim dedicado

À minha esposa Salete, pelo amor e
compreensão

Aos meus filhos João Paulo e Juliana

A meus irmãos

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo fortalecimento nas horas difíceis.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Apoio ao Ensino, Pesquisa e Extensão (FAEPE), pelo auxílio financeiro.

Ao professor Nilton Curi, orientador, e aos professores Geraldo Aparecido de Aquino Guedes e Alfredo Scheid Lopes, demais membros do comitê de orientação, pelo direcionamento e amizade.

Ao professor Mauro Resende, da Universidade Federal de Viçosa (MG), pelas oportunas críticas e sugestões.

Aos professores José Oswaldo Siqueira, Janice Guedes de Carvalho, João Batista Soares da Silva, Jeziel Cardoso Freire, José Vitor da Silveira, Ruben Delly Veiga e Vicente Gualberto, pelo apoio e sugestões oportunas durante a realização deste trabalho.

Ao pesquisador Antônio Carlos Moniz, do Instituto Agrônomico de Campinas (SP), ao professor Nestor Kämpf, da Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e, ao acadêmico de agronomia da ESAL, Marcos Alexandre Grande, pelo auxí -

lio na obtenção dos difratogramas de raios X e termogramas.

Ao professor Nilton Curi, pela versão do resumo para o inglês.

Aos funcionários do Departamento de Ciência do Solo, especialmente Adalberto, Humberto, Delanne, João Gualberto, Anamaria, Ana Lúcia, Vera, Elaise, Jairo, Edinho, Bosco e Arlindo, pelas colaborações prestadas e amizade.

Ao bibliotecário Adriano Serrano, pela correção das referências bibliográficas.

A Maria Auxiliadora de Resende Braga, pela datilografia e amizade.

A todos os colegas de curso, especialmente Mathilde Aparecida Bertoldo e Lúcio Flávio Pereira, pela amizade e agradável convivência durante o curso.

BIOGRAFIA

JEFERSON ANTONIO DE SOUZA, filho de Antônio Evangelista de Souza e Dulce Silveira de Souza, nasceu no município de Ibituruna (MG), em 6 de fevereiro de 1956.

Concluiu o primeiro e segundo graus no Colégio Nossa Senhora Aparecida, Lavras (MG). Em 1976 ingressou na Escola Superior de Agricultura de Lavras (ESAL), graduando-se Engenheiro Agrônomo em dezembro de 1979.

De fevereiro de 1980 a fevereiro de 1983, trabalhou no Instituto de Terras do Amazonas (ITERAM) em Manaus (AM).

Em março de 1983, iniciou o curso de Mestrado em Agronomia, área de Solos e Nutrição de Plantas, na Escola Superior de Agricultura de Lavras, concluindo-o em setembro de 1985.

SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO.....	01
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	04
2.1. Características químicas e mineralógicas dos Latos <u>s</u> solos.....	04
2.2. Formas e reações de fósforo nos Latossolos.....	06
2.3. Sorção de fósforo em Latossolos.....	09
2.3.1. Adsorção: Fatores que afetam a quantidade de fósforo retida.....	09
2.3.1.1. Retenção de fósforo pelos constitu <u>tu</u> intes do solo.....	12
2.3.1.2. Isotermas de adsorção de P.....	14
2.3.2. Reversibilidade das reações de adsorção....	15
2.4. Disponibilidade de fósforo nos Latossolos.....	17
2.4.1. Efeito da calagem na disponibilidade de P para as plantas.....	17
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	19
3.1. Aspectos gerais da área estudada.....	19
3.2. Caracterização física e química.....	22
3.3. Capacidade máxima de adsorção e, dessorção de fós- foro.....	24

3.4. Caracterização mineralógica.....	26
3.4.1. Análises de difração de raios X (DRX).....	26
3.4.2. Análise Térmica Diferencial (ATD).....	27
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	28
4.1. Caracterização física.....	28
4.2. Relações de cor.....	30
4.3. Caracterização química.....	31
4.4. Caracterização mineralógica.....	35
4.5. Estudos de adsorção e dessorção de P.....	41
5. RESUMO E CONCLUSÕES.....	50
6. SUMMARY AND CONCLUSIONS.....	53
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	56

LISTA DE QUADROS

Quadro		Página
1	Classificação dos solos estudados conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.....	21
2	Características físicas e químicas da camada de 0-20 cm dos pedomateriais estudados.....	29
3	Coloração úmida dos pedomateriais da camada de 0-20 cm de uma topossequência de Latossolos do Planalto Central, originados de basalto.....	30
4	Teor de óxidos (%) extraídos pelo ataque sulfúrico 1:1 (s), por DCB (Al_d e Fe_d), por oxalato ácido de amônio 0,2M (Al_o e Fe_o) e por pirofosfato de potássio 0,1M (Al_p e Fe_p).....	32
5	Teores de caulinita e gibbsita (%), determinados por ATD, na fração argila desferrificada.....	39
6	Valores de adsorção máxima de fósforo-AMF ($\mu g/g$) de uma topossequência de Latossolos do Planalto Central, antes (Co) e após calagem (Cl) e, de óxidos de Fe e, de silicatos e gibbsita.....	43

Quadro

Página

7 Índice de dessorção de fósforo-IDF ($\mu\text{g/g}$) de uma toposseqüência de Latossolos do Planalto Central, antes e após calagem e, de óxidos de ferro e, de silicatos e gibbsita e, relação P dessorvido/P adsorvido (IDF/AMF) da TFSA na ausência e presença de calagem.....

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Localização da área amostrada (a) e posição esquemática dos perfis na toposseqüência (b).....	20
2	Difratogramas de raios X da fração argila (amostras orientadas) do horizonte A de três Latossolos, membros de uma toposseqüência sobre basalto, do Planalto Central. Ct= caulinita; Gb=gibbsita.....	36
3	Difratogramas de raios X da fração argila (método do pó) concentrada com NaOH 5M do horizonte A de três Latossolos, membros de uma toposseqüência sobre basalto, do Planalto Central. Gt= goethita; Hm= hematita; Sd= sodalita; An= anatásio.....	37
4	Curvas de Análise Térmica Diferencial (ATD) para o horizonte A de três Latossolos sobre basalto, do Planalto Central. Ct= caulinita; Gb= gibbsita.....	40

Figura

Página

- 5 Quantidade adsorvida de P em função da quantidade adicionada nos materiais de solos (horizonte A) de uma toposseqüência de Latossolos do Planalto Central, antes e após a calagem e, nos óxidos de Fe e, silicatos e gibbsita..... 45
- 6 Isotermas de dessorção de P dos pedomateriais sem calagem (Co) e com calagem (Cl) e, dos componen - tes mineralógicos (óxidos de ferro e, silicatos e gibbsita) da fração argila de três Latossolos, mem - bros de uma toposseqüência sobre basalto, do Pla - nalto Central..... 47

1. INTRODUÇÃO

As áreas sob vegetação natural de cerrado ocupam cerca de 20% do território brasileiro, em uma região de estratégia agrícola. Os Latossolos ocupam em torno de 56% destas áreas, de acordo com os levantamentos pedológicos existentes, Sanchez et alii, citados por HOEFLICH et alii (34).

A viabilidade de um aproveitamento racional desses solos depende da sobrepujança de alguns fatores, entre os quais se sobressai a baixa fertilidade natural. Além disso, a intensa retenção de P nestes solos é uma restrição ao crescimento e desenvolvimento das culturas. Há também que se considerar a significância agronômica da reversibilidade das reações de adsorção de P pelos componentes do solo, a qual irá controlar o fluxo deste nutriente -problema para a solução do solo. Desta forma, a correção destas limitações certamente possibilitará uma agricultura racional e intensiva, adotando-se medidas embasadas em dados de pesquisa, objetivando minimizar a retenção e maximizar a dessorção de P, bem como, aumentar o aproveitamento dos fertilizantes fosfatados aplicados.

Sendo a sorção de P um fenômeno principalmente de superfície o tamanho médio dos cristalitos dos constituintes mineralógicos da fração argila do solo se destaca como um dos principais fatores que influenciam estas reações. Considerando-se a influência diferencial destes componentes, representados neste estudo, basicamente, pelos óxidos de Fe e, silicatos e gibbsita, procurou-se avaliar as alterações na extensão das reações de retenção e/ou liberação influenciadas por estes dois sistemas mineralógicos "puros". Entretanto, no contexto do solo como um todo, surgem dificuldades na transposição desses conhecimentos de maneira generalizada, pelo efeito da interação existente quando os dois sistemas "puros" atuam em conjunto com outros fatores e interações. Vale a pena relembrar que, do ponto de vista agrônomo, o que interessa é saber qual a quantidade do P adicionado que poderá ser utilizada pelo vegetal.

Partindo-se do pressuposto de que:

a. A cor do solo, por estar refletindo os componentes oxidicos, indica, dentro da mesma região fisiográfica e classe de solo com teor de ferro similar, comportamento diferencial dos solos quanto às características de sorção de fósforo e sua consequente disponibilidade para as plantas; e que

b. dentre estes componentes, a goethita parece conferir aos solos maior capacidade de adsorção e menor de dessorção, este trabalho se justifica pelos reduzidos trabalhos envolvendo o relacionamento entre as várias formas de ferro destes solos e as características de sorção, sobretudo, aqueles englobando a reversi-

bilidade das reações de adsorção.

Diante do exposto, o presente trabalho tem como objetivos principais:

a. Identificar e caracterizar os componentes mineralógicos da fração argila da camada superficial de alguns Latossolos sob cerrado do Planalto Central, com elevados teores de ferro; e,

b. relacionar os parâmetros de sorção de fósforo com algumas características e propriedades dos solos.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Características químicas e mineralógicas dos Latossolos

Em linhas gerais, os Latossolos são quimicamente pobres, caracterizando-se por níveis extremamente baixos de capacidade de troca de cátions. Além de apresentarem baixo teor de P disponível, geralmente possuem alta capacidade de retenção de fosfatos. Todavia, dentre os Latossolos, ressaltam-se aqueles desenvolvidos de rochas máficas, com elevados teores de ferro e, em geral, de maior potencial no que se refere à facilidade de recuperação devido, talvez, aos altos teores totais de fósforo, BRASIL (14) e micronutrientes, CURI (18) e RUEGG (71).

Os principais minerais da fração argila dos Latossolos brasileiros são, em diferentes proporções, caulinita, gibbsita, goethita e hematita, RESENDE & FRANZMEIER (69). A maghemita tem sido detectada em alguns solos vermelhos com altos teores de ferro, CURI (18). Nestes solos, quando sob cerrado, a hematita tende a estar associada à gibbsita refletindo, basicamente, uma concentração relativamente alta de Fe em solução, enquanto a goethita tende a se encontrar associada à caulinita em condições de maior

regime de umidade e matéria orgânica, CURI & FRANZMEIER (19) e RESENDE (68). De acordo com CURI (18), a mineralogia da fração argila destes solos é composta, basicamente, por dois sistemas:

- Sistema gibbsita-caulinita: este sistema é dependente da quantidade de Si na rocha de origem, teores de Ti e Fe, atividade da matéria orgânica, intensidade de intemperismo e de outros aspectos da rocha matriz.

A caulinita é favorecida por alto regime de carbono orgânico e baixo teor de Fe e Ti na rocha de origem, RESENDE (68). A formação da gibbsita é inibida pelas condições que favorecem a caulinita.

- Sistema de óxidos (termo inclusivo para óxidos, oxihidróxidos e hidróxidos) de Fe: de acordo com FISCHER & SCHWERTMANN (24), dentre os componentes oxídicos dos solos e sedimentos, a goethita e a hematita são os mais comuns. A goethita é a forma universal na fração argila dos Latossolos brasileiros. A formação de hematita é precedida por uma agregação de ferrihidrita e uma nucleação dentro destes agregados. Condições de excesso de umidade, alto teor de carbono orgânico e pH baixo favorecem a formação de goethita e temperaturas mais altas, teor mais elevado de Fe^{3+} em solução e pedoclima mais seco favorecem a formação de hematita, entre outros.

2.2. Formas e reações de fósforo nos Latossolos

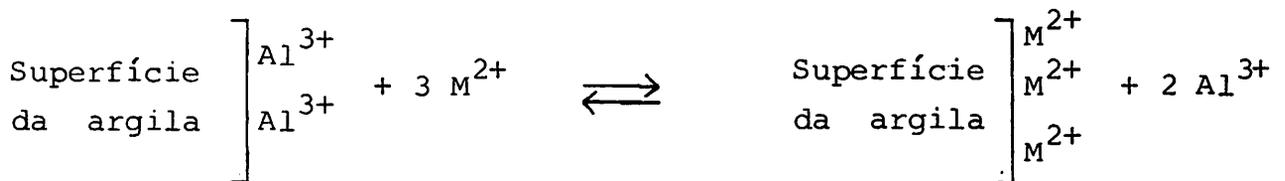
No solo, o fósforo pode ser encontrado de duas formas: fósforo orgânico que corresponde àquele que faz parte de compostos orgânicos, como ácidos nucleicos, fosfolipídeos, etc, MALAVOLTA (48) e, fósforo inorgânico que pode estar na forma disponível (P lábil) ou não disponível. Segundo BARROW (8), CHANG & JACKSON (16) e outros, o P inorgânico reage com íons Al e Fe presentes na solução de solos altamente intemperizados, formando compostos de baixa solubilidade. SANCHEZ (74) menciona que, além destas, ocorrem outras duas formas: P ocluso e P total ou parcialmente solúvel em condições anaeróbicas. A forma considerada lábil corresponde ao P da solução do solo mais aquele fracamente adsorvido, o qual, posteriormente, pode se tornar não lábil ou ocluso, RAIJ (66).

Os processos através dos quais o íon fosfato presente na solução do solo é transformado para tornar-se um constituinte da fase sólida são diversos e complexos. KARIM & ADAMS (42) destacam a precipitação (formação de compostos insolúveis ou fracamente solúveis) e, reações em que o fosfato da solução do solo é retido na superfície dos minerais. Conforme PARFITT & RUSSEL (64) e RYDEN et alii (72), o fosfato torna-se quimiossorvido nos constituintes do solo por um mecanismo chamado troca de ligantes e é conhecido comum que a superfície de diversos minerais do solo pode participar desta reação.

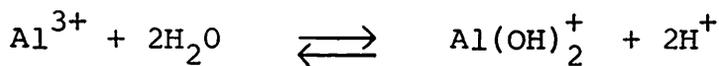
- Reações de precipitação: TISDALE & NELSON (82) mencionam que em solos ácidos, os íons Al e Fe encontram-se presentes em quantidades apreciáveis e estes íons se combinam com íons fosfato para formar compostos insolúveis de Al-P ou Fe-P.

De acordo com SANCHEZ & UEHARA (75), estas reações podem ser esquematizadas da seguinte forma:

a. Troca de cátions:



b. Hidrólise:



c. Precipitação:

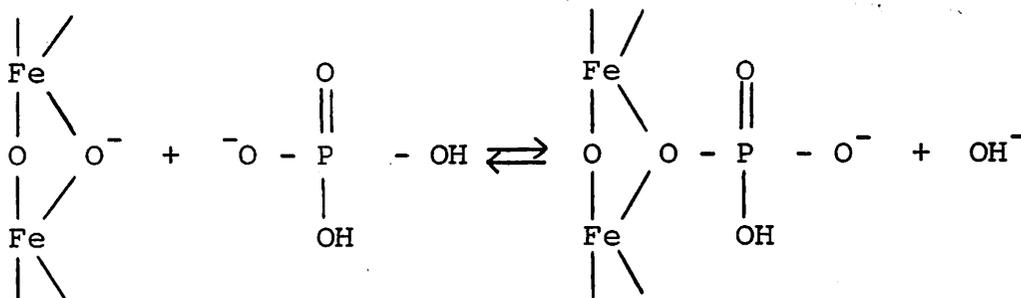
$\text{Al}(\text{OH})_2^+ + \text{H}_2\text{PO}_4^- \rightleftharpoons \text{Al}(\text{OH})_2\text{H}_2\text{PO}_4$, sendo M um íon divalente em solução. A reação pode também ocorrer com Fe e Mn.

Conseqüentemente, 1 mol de Al trocável hidrolizado precipita 1 mol do íon ortofosfato; no entanto, nem todo Al trocável do solo é hidrolizado em condições de campo, o que torna este mecanismo menos intenso do que seria esperado.

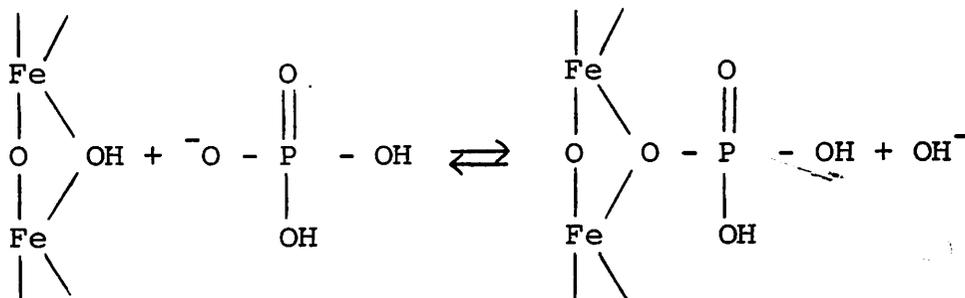
- Reações de adsorção: os íons fosfato presentes na solução do solo entram em reações de troca de ligantes com hidroxilas na superfície de partículas ou películas de óxidos. Devido ao seu comportamento anfotérico, as superfícies dos óxidos podem exibir

carga líquida negativa, zero ou positiva. Desta forma, três reações são sugeridas por SANCHEZ & UEHARA (75):

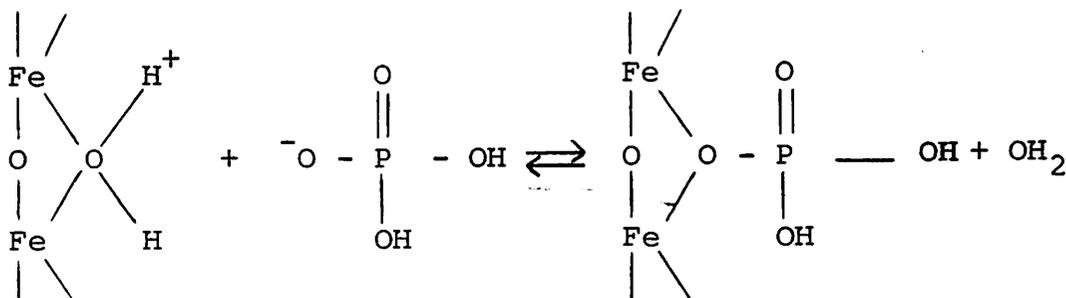
a. Acima do PZC - superfície do óxido com carga líquida negativa:



b. No PZC - superfície do óxido com carga líquida zero:



c. Abaixo do PZC - superfície do óxido com carga líquida positiva:



Nos solos com colóides de carga variável, o sinal e magnitude da carga de superfície dependem do pH.

O mecanismo de adsorção é dependente, entre outros, do tempo de contato e da concentração da solução. HSU (36), MUNNS & FOX (53), RAJAN & FOX (67) e RYDEN et alii (72) reconheceram duas fases distintas desse mecanismo: uma que se processa mais rapidamente devido a uma adsorção de fosfato na superfície dos óxidos de Al e de Fe já existentes no solo e, uma outra reação, muito mais lenta, devido à adsorção superficial em óxidos similares desenvolvidos durante o experimento. RAJAN & FOX (67) consideram estas duas fases uma função de concentração, ou seja, em baixas concentrações, o fosfato é adsorvido nos sítios altamente reativos por troca com OH_2 e outros ânions adsorvidos especificamente, enquanto que com o aumento das concentrações, os sítios menos reativos podem também adsorver o fosfato através do mesmo mecanismo.

2.3. Sorção de fósforo em Latossolos

2.3.1. Adsorção: Fatores que afetam a quantidade de fósforo retida

A reação entre o íon fosfato e os constituintes do solo é um dos pontos mais frequentemente estudados na ciência do solo devido à ocorrência generalizada de deficiência de fósforo e a natureza complexa do problema.

Inúmeros fatores estão interligados ao mecanismo de retenção de fósforo pelos solos, alguns dos quais serão destacados a seguir.

A matéria orgânica assume duplo papel na retenção de fosfatos, formando complexos estáveis com Fe e Al, SANCHEZ & UEHARA (75) e TISDALE & NELSON (82), ou através do bloqueio dos sítios de adsorção pelos produtos de sua degradação, FOX & KAMPRATH (25). Segundo GUEDES (29), os componentes orgânicos na superfície do solo podem contrabalancear as superfícies de colóides inorgânicos carregadas positivamente e decrescer a energia de ligação, aumentando a liberação de P.

Entre os Latossolos de uma mesma região fisiográfica, com mineralogia de argila e tamanho de cristalitos similares, a fixação de fósforo aumenta com o incremento do teor de argila. Neste sentido, correlações positivas têm sido encontradas, BAHIA FILHO (6), LEAL & VELLOSO (43) e LOPES & COX (45).

JUO & FOX (39) consideram que o principal fator do solo que afeta a sorção de fósforo é sua mineralogia. Segundo SANCHEZ & UEHARA (75) e TISDALE & NELSON (91), as argilas cauliníticas (1:1) fixam mais P do que as esmectíticas (2:1). Os óxidos de Fe e Al têm sido freqüentemente apontados como os principais responsáveis pela retenção de fosfatos, PARFITT et alii (62 e 63) e RAJAN & FOX (67). Em Latossolos sob cerrado, com predominância de gibbsita e óxidos de Al menos cristalinos na fração argila, LEAL & VELLOSO (43) observaram maior capacidade de adsorção de fosfatos. De acordo com JUO & FOX (39), dentro de um mesmo grupo mineralógico, a adsorção de P está extremamente relacionada com a área específica. Estas evidências sugerem que além da identificação dos componentes mineralógicos, qualitativa e quantitativamente, é importan

te na adsorção de fosfatos, a determinação da área superficial es
pecífica.

Várias formas de óxidos de ferro ocorrem nos solos e in
fluenciam profundamente suas propriedades químicas e físicas, BORG
GAARD (11). Algumas formas são inertes nas reações químicas, ao
passo que outras são altamente adsorptivas de fosfatos, tais como
os hidróxidos de Fe recentemente precipitados, HSU (36). Há muito
tempo, os óxidos de Fe livres totais têm sido extraídos pelo ditio
nito-citrato-bicarbonato de sódio (DCB), MEHRA & JACKSON (50), po
rém McKEAGUE & DAY (49) evidenciaram que este procedimento não se
para adequadamente os compostos não cristalinos dos cristalinos. O
oxalato ácido de amônio surgia como um extrator mais efetivo de
formas menos cristalinas, cujos valores dão uma aproximação do
grau de acumulação de produtos não cristalinos de formação recen-
te. Altas quantidades de Fe e Al extraídas pelo oxalato são asso-
ciadas com horizontes tendo alta carga dependente de pH e alta ca-
pacidade de fixação de P. O Fe e Al complexado com radicais orgâ-
nicos é eficientemente extraído pelo pirofosfato de potássio 0,1M,
BASCOMB (9). Segundo KARIM & ADAMS (42), as quantidades de Fe e Al
extraídas pelo pirofosfato e oxalato foram muito baixas e não se
correlacionaram significativamente com a adsorção de fosfato. Já
o Fe e Al extraídos pelo DCB se correlacionaram com a capacidade
de fixação. Estes autores citam ainda que Maida encontrou correla-
ção entre Fe e Al do oxalato e retenção de P.

De acordo com LOPES & COX (45), o Al_2O_3 extraído pelo ata-
que sulfúrico apresentou correlações mais altas com os parâmetros

de fixação de P do que o Fe_2O_3 do ataque sulfúrico ou livre; no entanto, não houve boa correlação entre Al trocável e capacidade de adsorção. Mais recentemente, CURI et alii (20) trabalhando com materiais de Latossolos (horizonte Bw) do Brasil Sudeste e Sul, encontraram que o Fe_2O_3 do ataque sulfúrico 1:1 (v/v) foi o parâmetro que mais explicou a variabilidade da adsorção máxima de fósforo (AMF), além de apresentar a maior operacionalidade nos testes realizados objetivando a eleição de características para auxiliar na separação e distinção de classes. Em vista disso, foram sugeridas três classes de AMF, tomando como base o teor de Fe_2O_3 : baixa |AMF < 1000 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ (Fe_2O_3 < 8%)|; média |AMF de 1000 a 2500 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ (Fe_2O_3 entre 8 e 24%)|; e alta |AMF > 2500 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ (Fe_2O_3 > 24%)|.

2.3.1.1. Retenção de fósforo pelos constituintes do solo

Os principais minerais do solo responsáveis pela adsorção específica de ânions são os óxidos cristalinos e não cristalinos de Fe e Al e, os aluminossilicatos não cristalinos, Wild, citado por SAMPLE et alii (73). No geral, formas não cristalinas e formas com pequeno grau de cristalização retêm mais fosfato por unidade de peso do que formas bem cristalizadas, FOX & SEARLE (26), JUO & FOX (39) e SCHALSCHA et alii (76).

- Retenção pelos óxidos de Fe e Al: BAHIA FILHO (5), CURI (18), JONES (37), PARFITT (61) e JUO (38) mencionam que o mecanismo de adsorção de P nos óxidos tem sido melhor caracterizado para a goethita (α - FeOOH) comumente presente na fração argila de so

los altamente intemperizados. BAHIA FILHO (5) e CURI (18) concluíram que a goethita foi a principal responsável pelo processo de retenção de fosfatos em Latossolos sob cerrado do Planalto Central. No entanto, GUALBERTO (28) observou alterações pronunciadas, no que se refere a tamanho e grau de substituição da goethita em solos de regiões fisiográficas distintas, sugerindo que as generalizações principalmente relacionadas com a adsorção de P, devem ser restritas a condições específicas. Naquele trabalho, o autor verificou que a goethita da região Amazônica (solo PT) apresentou menor adsorção que a hematita do Planalto Central (solo G6).

Conforme HINGSTON et alii (33), a superfície da goethita consiste de uma camada de íons Fe^{3+} coordenados octaedralmente com íons OH^- e moléculas de água. O íon fosfato é capaz de permutar com OH^- e OH_2 tornando-se coordenado ao íon metálico na superfície do mineral e adsorvido especificamente. De acordo com NORRISH & TAYLOR (58), na estrutura da goethita a substituição isomórfica do Fe^{3+} pelo Al^{3+} ocorre naturalmente, podendo provocar uma redução na dimensão média do cristalito de goethita; segundo KARIM & ADAMS (42), esta goethita com substituição em Al é o principal responsável pela retenção de P. CURI (18) ressaltou que, dentro da mesma topossequência de solos, esta substituição é muito mais intensa na goethita (até 32 mol %) do que na hematita (até 16 mol %).

Conclusões de SAMPLE et alii (73) sugerem que os óxidos de Fe e Al retém grande quantidade de P da solução do solo, o que foi verificado também por Wild, citado por SAMPLE et alii (73), que

concluiu que estes compostos explicam muito a retenção de P nos solos ácidos. No entanto, a quantidade retida depende do tempo de reação, temperatura, pH e concentração da solução, entre outros.

- Retenção pelos minerais aluminossilicatados: Muitos pesquisadores encontraram variações na quantidade de fósforo retida pelos diversos minerais aluminossilicatados.

SAMPLE et alii (73) citam que, segundo Pissarides et alii, o fósforo retido a baixas concentrações foi adsorvido em concordância com a isoterma de Langmuir. Por causa da similaridade entre a isoterma dos aluminossilicatos e a dos óxidos, SAMPLE et alii (73) mencionam que diversos pesquisadores têm concluído que o mecanismo de retenção é o mesmo para os dois grupos de minerais.

KARIM & ADAMS (42) concluíram que o conteúdo de caulinita não se correlacionou com a capacidade de fixação de fosfatos, o que não implica que a caulinita não seja responsável por uma proporção da adsorção. Citam ainda que, Muljadi et alii encontraram que a caulinita apresentou significativa capacidade de retenção de P. No entanto, esta capacidade de adsorção foi bastante baixa, sendo em média 164 mg de P/kg.

2.3.1.2. Isotermas de adsorção de P

O decréscimo da concentração de fósforo na solução do solo, em decorrência do mecanismo de retenção tem sido estimado por equações de isotermas de adsorção. O valor da adsorção máxima tem sido usado como uma estimativa da quantidade de fósforo requerida

para proporcionar desenvolvimento ótimo das plantas. WOODRUFF & KAMPRATH (87) obtiveram crescimento máximo com doses variando de 0,25 a 1,00 x o valor da adsorção máxima. ALMEIDA NETO & BRASIL SOBRINHO (2), BAHIA FILHO & BRAGA (7), BRAGA & DEFELIPO (13) e VASCONCELOS et alii (84) têm sugerido doses variando de 0,4 a 1,3 x o valor da adsorção máxima para se obter máxima produção. CORONEL & LÓPEZ-HERNANDES (17) concluíram que o método das isotermas fornece uma predição de 90-96% da dose ótima. No entanto, NOVAIS & KAMPRATH (57) têm se manifestado contra a utilização de apenas o valor da adsorção máxima para recomendação da adubação fosfatada, a qual, desta maneira, tornar-se-ia apenas uma função do valor da adsorção máxima como "fator capacidade" de fósforo.

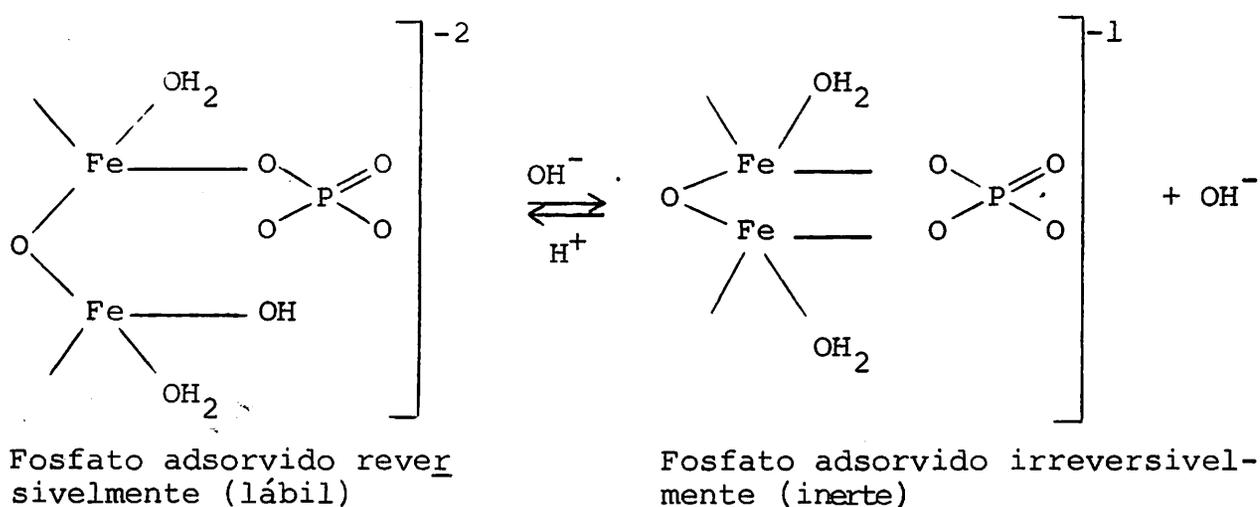
Apesar do frequente uso das equações de Langmuir para predizer as quantidades máximas retidas, HARTER (30) coloca em questionamento sua validade. Segundo este autor, plotar a concentração contra ela própria reduz a variabilidade dos dados e proporçiona a obtenção de coeficientes de correlação estatisticamente significativos, além de induzir a erros de 50% ou mais no valor da adsorção máxima se a equação não for adequadamente ajustada aos dados.

2.3.2. Reversibilidade das reações de adsorção

Muitos estudos têm mostrado que o fosfato retido no solo pode ser lentamente dessorvido; contudo, a retenção tem sido descrita como variando entre a completa reversibilidade e a quase total irreversibilidade, HINGSTON et alii (32). Estes autores menço

cionam que, quando a isoterma foi irreversível, OH^- foi dessorvid \bar{u} do (ou H^+ adsorvido) ao invés do ânion adsorvido especificamente, enquanto que quando reversível, o ânion especificamente adsorvido foi dessorvido.

Tanto para os minerais aluminossilicatados como para os óxidos, a reversibilidade ou irreversibilidade pode ocorrer. Segundo HINGSTON et alii (32), quando somente ligantes monodentados se formam, a isoterma é reversível, enquanto que quando são formados ligantes multidentados ocorre a irreversibilidade, conforme mostra o esquema abaixo:



HINGSTON et alii (32) encontraram que a dessorção de P da goethita foi significativamente menor que a da gibbsita. O comportamento mais reversível dos ânions adsorvidos na gibbsita sugere que os complexos de superfície entre Al^{3+} e ânions são mais lábeis que aqueles entre Fe^{3+} e ânions.

2.4. Disponibilidade de fósforo nos Latossolos

A maior parte das culturas vegetais requer entre 0,2 e 0,3 ppm de P na solução para produzir 95% do seu rendimento máximo, de acordo com NISHIMOTO et alii (56).

Partindo-se do pressuposto de que a disponibilidade de fósforo é limitada pela alta capacidade de retenção e baixa capacidade de dessorção da maioria dos Latossolos, justifica-se, desta forma, a baixa produtividade como função da deficiência de fósforo para as plantas.

As reações entre o fósforo e os constituintes do solo responsáveis pela redução na sua disponibilidade tornam necessárias e evidentes certas considerações de manejo.

2.4.1. Efeito da calagem na disponibilidade de P para as plantas

A aplicação de corretivos com o objetivo de reduzir a retenção de fósforo tem sido uma prática recomendada, baseada no fato de que estes, direta ou indiretamente, irão bloquear sítios de retenção, SMYTH & SANCHEZ (81). Entretanto, os resultados têm variado de benéficos a detrimenais.

Em solos com alto teor de Al^{3+} , a adsorção de P foi reduzida com o aumento do pH pela calagem, AWAN (4), LÓPEZ-HERNANDEZ & BURNHAM (46), OBIHARA & RUSSEL (60), UDO & UZU (83) e WHITE & TAYLOR (86). Em solos com pH original entre 5 e 6, em que o pH se

aproximou da neutralidade, a calagem teve efeito adverso na disponibilidade de P, ABRUNA et alii (1), AMARASIRI & OLSEN (3). FARINA et alii (23), LUTZ et alii (47) e RHUE & HENSEL (70).

Indiretamente, os efeitos da calagem podem ser verificados através da alteração das cargas elétricas e de outras propriedades físico-químicas do solo.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Aspectos gerais da área estudada

Utilizou-se pedomateriais de três Latossolos originados de material basáltico, sob vegetação de cerrado, amostrados na camada de 0 a 20 cm de acordo com coloração, atração magnética e posição dos pedons na topossequência. A área amostrada localiza-se no município de Itumbiara, sul do estado de Goiás, próximo à divisa do estado de Minas Gerais (região do Triângulo Mineiro), cerca de 6 km da ponte sobre o Rio Paranaíba, com uma declividade geral de 3-4% (Figura 1) e altitude de aproximadamente 500 m.

Conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, ora em desenvolvimento, o Quadro 1 mostra a classificação dos solos amostrados.

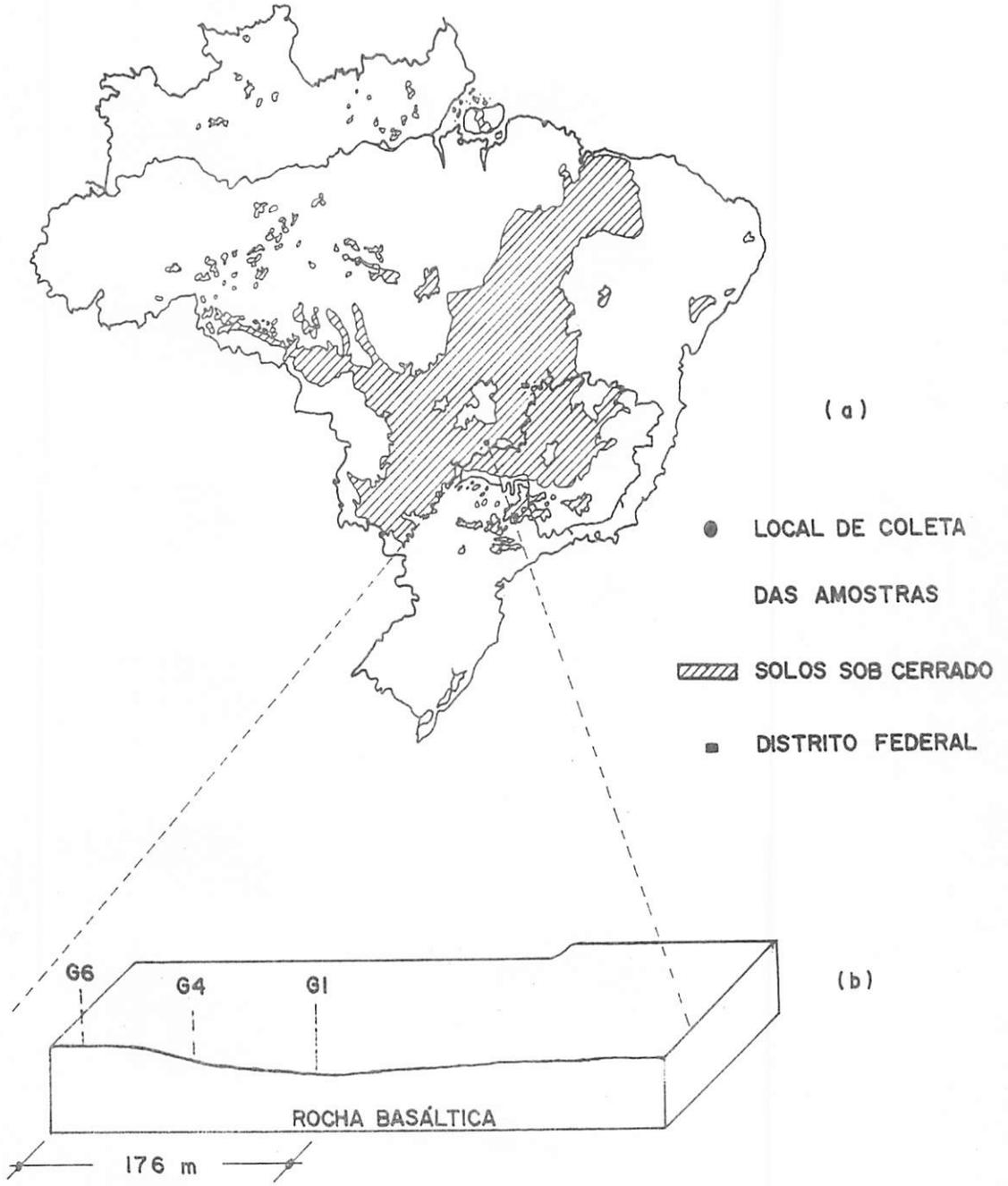


FIGURA 1. Localização da área amostrada (a) e posição esquemática dos perfis na toposseqüência (b).

QUADRO 1. Classificação dos solos estudados conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.

Solo	Cor do horizonte A	Classificação
G1	10 YR 3/4	Latossolo Variação Una distrófico A moderado textura argilosa fase cerrado relevo plano.
G4	5 YR 3/4	Latossolo Variação Una distrófico A moderado textura muito argilosa fase cerrado relevo suave ondulado.
G6	2,5 YR 3/2	Latossolo Roxo distrófico A moderado textura muito argilosa fase cerrado relevo plano.

A cor superficial dos solos varia com a mudança na paisagem de 10 YR 3/4 no topo a 2,5 YR 3/2 na parte mais baixa do declive. O solo G1 situa-se no sopé, G4 na parte mediana da encosta e G6 no topo do declive (Figura 1).

A vegetação natural é o cerrado, porém, atualmente áreas semelhantes a esta estão sendo usadas com culturas (principalmente milho) e pastagens (principalmente braquiária). Anteriormente essas áreas foram usadas como pastagem natural e submetidas a queimas periódicas. A precipitação média anual é cerca de 1300 mm. O período úmido (dezembro-janeiro-fevereiro) é responsável por aproximadamente 50% da precipitação anual total, enquanto que durante os meses de junho-julho-agosto ocorre um período seco pronunciado. Os solos têm um regime de umidade ústico (mesmo os amarelados) e um regime de temperatura isoipertérmico. A temperatura média anual

do ar é de 24,4°C.

3.2. Caracterização física e química

A não ser quando especificado, as análises foram realizadas em materiais destorroados, secos ao ar e passados em peneira de 2 mm.

- Análise granulométrica: por agitação rápida, pelo método de BOUYUCOS (12).

- Densidade de partículas: de acordo com metodologia de BLAKE (10).

- Superfície específica: determinada por adsorção com éter monoetílico do etileno glicol (EMEG), conforme HEILMAN et alii (31).

As análises químicas foram realizadas seguindo os procedimentos descritos por VETTORI (85) com modificações, EMBRAPA (21), salvo especificações.

- pH: determinado potenciométricamente usando eletrodo de vidro, em H_2O e em KCl 1N (1:2,5).

- Cátions trocáveis: extração com KCl 1N (1:20) e determinação de Ca e Mg por absorção atômica e de Al por titulação com NaOH 0,025N; extração com HCl 0,05N + H_2SO_4 0,025N e determinação de K e Na por fotometria de chama.

- Carbono orgânico: determinado por oxidação úmida com $K_2Cr_2O_7$. A percentagem de matéria orgânica foi estimada, multiplicando-se a % de C org. por 1,724.

- P disponível: extração com HCl 0,05N + H_2SO_4 0,025N e determinação por colorimetria em comprimento de onda de 660nm.

- Óxidos do ataque sulfúrico: foram determinados após digestão com H_2SO_4 1:1 (Al_2O_3 , Fe_2O_3 , P_2O_5 , SiO_2 e TiO_2), conforme EMBRAPA (21).

- Extrações com DCB, Oxalato de amônio e Pirofosfato de potássio: foram determinados na TFSA e na fração argila, através de 4 extrações sucessivas:

. Digestão com DCB (ditionito-citrato-bicarbonato de sódio), segundo metodologia de MEHRA & JACKSON (50), para extração dos óxidos de Fe e Al livres totais;

. Digestão com Oxalato Ácido de Amônio 0,2M, método de SCHWERTMANN (73), objetivando extrair Fe e Al ligados a materiais menos cristalinos.

. Digestão com Pirofosfato de Potássio 0,1M, conforme BASCOMB (9), visando extrair Fe e Al complexados com matéria orgânica.

O Al (Al_d , Al_o , Al_p) e Fe (Fe_d , Fe_o , Fe_p) no extrato foram determinados por absorção atômica.

. Acidez extraível (H^+ + Al^{3+}): extração com $Ca(OAc)_2$, pH 7,0, e determinação por titulação com $NaOH$ 0,0606N.

- Micronutrientes disponíveis (Cu, Fe, Mn e Zn): foram extraídos com HCl 0,05N + H₂SO₄ 0,025N segundo LOPES & COX (44), e determinação no extrato por absorção atômica.

3.3. Capacidade máxima de adsorção e, dessorção de fósforo

Foi realizado um estudo de adsorção-dessorção objetivando-se estimar a capacidade de retenção e de liberação de P pelo solo e pelos seus componentes mineralógicos, segundo metodologia utilizada por CURI & FRANZMEIER (19).

- Adsorção de P: neste estudo foram utilizados três materiais: TFSA (com e sem calagem), óxidos de ferro e, silicatos e gibbsita. A calagem foi calculada com base na curva de neutralização dos solos, obtida pelo processo de incubação, QUAGGIO (65). As quantidades de calcário foram calculadas para elevar o pH dos solos a valores situados na faixa de 5,5 a 6,0 (Cl), normalmente recomendada para solos sob cerrado. Os óxidos de Fe foram concentrados tratando-se a fração argila com NaOH 5M, KÄMPF & SCHWERTMANN (40) e os silicatos e gibbsita, através tratamento com DCB, MEHRA & JACKSON (50). Foram adicionadas soluções de P em concentrações de 0 a 300 ppm, preparadas em CaCl₂ 0,01M. Após agitação (12 horas) e centrifugação, o P no sobrenadante foi determinado por colorimetria, pelo método de MURPHY & RILEY (54). A quantidade de P adsorvido foi calculada pela diferença entre a concentração inicial e a concentração final de P em solução.

Os dados foram avaliados admitindo-se dois tipos de sítios de adsorção e aplicando a equação de duas superfícies de Langmuir na seguinte forma:

$$(x/m) = \left(b^I - \frac{(x/m)^I}{K^I c} \right) + \left(b^{II} - \frac{(x/m)^{II}}{K^{II} c} \right)$$

sendo I e II = regiões de sítios de adsorção; b= adsorção máxima; K = constante da energia de ligação; c= concentração de equilíbrio de P; e (x/m)= teor de P adsorvido por unidade de peso de solo.

Quando se plota (x/m) versus (x/m)/c, método de "Eadie-Hofstee" obtém-se uma linha de formato curvo, que pode ser resolvida em duas linhas retas, de maneira que se obtenha o melhor ajuste da soma dessas duas linhas retas aos pontos obtidos experimentalmente, HOFSTEE (35). A partir dessas linhas, os valores de b e K podem ser obtidos (a interseção do eixo dos y e o recíproco da declividade de cada linha reta, respectivamente), NYCHAS & KOSMAS (59).

- Dessorção de P: para determinação da capacidade dessortiva de fósforo as amostras previamente usadas na adsorção foram utilizadas, adicionando-se soluções de CaCl_2 0,01M e determinando-se pelos mesmos procedimentos anteriores, o P no sobrenadante. A quantidade de P dessorvido foi considerada como aquela presente em solução após a agitação e a capacidade dessortiva, ou índice de Dessorção de Fósforo (IDF), como a média de quatro extrações, excluindo os valores de dessorção a partir de 200 ppm de P, devido a que estas concentrações saturaram o complexo sortivo de todos os solos e mascararam as diferenças entre eles.

3.4. Caracterização mineralógica

Para esta caracterização foi utilizada a fração argila.

3.4.1. Análises de difração de raios X (DRX)

Uma porção de TFSA de cada pedomaterial foi submetida à digestão com DCB, para eliminação de agentes cimentantes. Após este tratamento, a fração argila, obtida por centrifugação, foi saturada com cátions trocáveis, usando-se soluções de KCl 3N e MgCl₂ 2N. Após saturação da fração argila com K e Mg, uma pequena porção foi espalhada por esfregaço em uma lâmina de vidro. Duas outras lâminas, com argila saturada com K, foram preparadas da mesma forma anterior e aquecidas durante 4-6 horas, uma a 300°C e outra a 550°C.

As análises foram realizadas em um difratômetro Philips equipado com tubo de cobre e filtro de níquel, usando radiação $\text{CuK}\alpha$ no intervalo de 2 a 30 graus dois teta ($2-30^\circ 2\theta$), pertencente ao Instituto Agronômico de Campinas (SP).

A fração argila obtida por dispersão com NaOH 1N, foi tratada com NaOH 5M, KÄMPF & SCHWERTMANN (40), obtendo-se uma fração livre de silicatos e gibbsita. Após secagem em estufa a 110°C, a amostra foi passada em peneira de 0,053 mm para uniformização.

Os óxidos de ferro concentrados foram examinados pelo método do pó através DRX, em aparelho Philips, usando radiação $\text{CoK}\alpha$ pertencente à Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

A estimativa da substituição em Al na goethita foi calculada pelo método de SCHULZE (77), considerando-se os reflexos (110) e (111) para o cálculo da dimensão c. Para a hematita, usou-se o reflexo (110) e os cálculos da substituição de Al foram realizados segundo a curva de SCHWERTMANN et alii (79).

3.4.2. Análise Térmica Diferencial (ATD)

Uma porção da fração argila foi tratada com DCB, obtendo-se um resíduo sem óxidos de Fe e Al livres totais. Após secagem em estufa a 40°C durante a noite e passagem em peneira de 0,053mm, esta porção foi submetida à saturação com Mg^{2+} e posteriormente procedeu-se a análise térmica diferencial, objetivando-se quantificar caulinita e gibbsita. Através de curvas-padrão pode-se calcular a concentração final desses componentes na amostra.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Caracterização física

Os dados referentes à análise granulométrica, superfície específica e densidade de partículas, encontram-se no Quadro 2.

A granulometria dos três solos mostra uma nítida predominância da fração argila, o que é uma característica de solos altamente intemperizados originados de basalto. A estreita relação entre a composição da rocha matriz e a textura dos solos é evidente devido à pequena quantidade de minerais de granulação grosseira, altamente resistentes ao intemperismo, no material basáltico. Por outro lado, CURI (18) encontrou que na fração areia muito fina do horizonte Bw destes solos, dentre os minerais leves, o quartzo foi o mineral dominante, o qual, ao que tudo indica, foi adicionado de outras fontes, provavelmente do arenito Cretáceo (formação Bauru), devido à ausência deste mineral no basalto caracterizado.

A relação silte/argila está dentro dos limites teóricos para Latossolos e reflete o avançado grau de intemperismo dos solos estudados.

QUADRO 2. Características físicas e químicas da camada de 0-20 cm dos pedomateriais estudados.

Parâmetro	Unidade de expressão do resultado	Pedomaterial		
		G1	G4	G6
Argila	%	58	62	57
Silte	%	7	11	14
Areia grossa	%	5	5	5
Areia fina	%	30	22	24
Superfície específica	m ² /g	105	104	94
Densidade de partículas	g/cm ³	2,73	2,77	2,77
pH (H ₂ O) (Co)	-	5,6	4,8	5,3
pH (KCl) (Co)	-	4,8	5,2	4,4
Δ pH (pH KCl-pH H ₂ O)	-	-0,8	+ 0,4	-0,9
pH (H ₂ O) (Cl)	-	5,8	5,5	5,4
Al ³⁺ (Co)	meq/100g	0,1	0,1	0,4
Al ³⁺ (Cl)	meq/100g	0,1	0,1	0,1
Ca ²⁺ (Co)	meq/100g	1,3	0,2	0,4
Ca ²⁺ (Cl)	meq/100g	1,7	0,9	1,0
Mg ²⁺ (Co)	meq/100g	0,6	0,1	0,2
Mg ²⁺ (Cl)	meq/100g	0,7	0,3	0,7
K ⁺	meq/100g	0,15	0,06	0,07
Na ⁺	meq/100g	0,06	0,03	0,03
(H ⁺ + Al ³⁺)	meq/100g	5,06	3,30	6,27
T	meq/100g	7,2	3,7	7,0
V	%	29	11	10
S	meq/100g	2,1	0,4	0,7
"m"	%	4	20	36
C orgânico	%	2,3	1,5	1,9
P disponível	ppm	1	1	1
Cu	ppm	5,1	2,5	3,1
Fe	ppm	193,2	20,7	19,3
Mn	ppm	120,0	18,5	21,5
Zn	ppm	0,5	n.d.*	n.d.

* n.d.= não detectado.

A superfície específica é maior nos pedons mais amarelados (maior teor de goethita - vide caracterização mineralógica).

Os solos têm uma densidade de partículas relativamente alta, o que está em concordância com o seu teor de óxidos de ferro, em particular de magnetita.

4.2. Relações de cor

O Quadro 3 mostra a coloração úmida da TFSA, fração argila sem pré-tratamento e óxidos de Fe concentrados. Pode-se observar que basicamente os óxidos de Fe, representados neste estudo por goethita (G1) e goethita + hematita (G4 e G6), são os principais agentes pigmentantes destes pedossistemas.

QUADRO 3. Coloração úmida dos pedomateriais da camada de 0-20cm de uma topossequência de Latossolos do Planalto Central, originados de basalto.

Pedomaterial	TFSA	Fração argila	Óxidos de Fe concentrados
G1	10 YR 3/4	10 YR 4/6	10 YR 4/4
G4	5 YR 3/4	5 YR 4/4	5 YR 4/4
G6	2,5 YR 3/2	2,5 YR 2,5/4	2,5 YR 3/2

4.3. Caracterização química

Análises químicas de rotina: os valores de pH determinados em H_2O e em KCl 1N, cátions trocáveis, P disponível, micronutrientes e carbono orgânico encontram-se no Quadro 2. Os resultados referentes ao ataque sulfúrico, extração com DCB, oxalato de amônio e pirofosfato de potássio, são mostrados no Quadro 4.

O teor de Al^{3+} é baixo nos solos G1 e G4 e médio no G6, apesar do seu maior teor de gibbsita. Considerando-se que os solos estudados estão sob vegetação de cerrado, os teores de Al trocável e a consequente baixa saturação de Al ($\leq 20\%$) dos solos G1 e G4 desmentem a generalização de que os solos, dentro do contexto fitogeográfico dos cerrados, apresentam problemas relacionados com toxidez deste elemento. Isto sugere que não se pode relacionar, de forma simplista, a ocorrência de cerrado apenas à questão de fertilidade do solo.

A capacidade de troca de cátions (Valor T) é um indicativo da assembléia mineralógica destes solos, composta de argilas de atividade baixa (< 13 meq/100 g de argila, após correção para carbono), confirmada no estudo da mineralogia destes solos.

A saturação de bases (Valor V), embora menor que 50% para todos os solos (distróficos), é mais elevada no solo G1, talvez devido a adições de materiais advindos de posições mais elevadas da paisagem, via fluxo superficial e subsuperficial de água.

QUADRO 4. Teor de óxidos (%) extraídos pelo ataque sulfúrico 1:1(s), por DCB (Al_d e Fe_d) por oxalato ácido de amônio 0,2M (Al_o e Fe_o) e por pirofosfato de potássio 0,1M (Al_p e Fe_p).

Parâmetro	Pedomaterial					
	G1		G4		G6	
	TFSA	Fração argila	TFSA	Fração argila	TFSA	Fração argila
- Ataque sulfúrico						
Al_2O_3 (s)	28,8		28,6		27,1	
Fe_2O_3 (s)	18,2		19,2		22,9	
P_2O_5 (s)	0,16		0,12		0,17	
SiO_2 (s)	19,5		12,5		11,5	
TiO_2 (s)	5,80		6,56		5,90	
Ki	1,15		0,74		0,72	
Kr	0,82		0,52		0,47	
- DCB						
Al_d	0,77	0,77	0,78	0,74	0,39	0,40
Fe_d	4,75	4,33	5,76	5,01	5,39	4,39
Al_d/Fe_d	0,16	0,18	0,14	0,15	0,07	0,09
- Oxalato de amônio						
Al_o	0,80	0,80	1,00	1,20	0,95	1,15
Fe_o	1,00	0,95	1,14	1,56	1,84	2,33
Al_o/Fe_o	0,80	0,84	0,88	0,77	0,52	0,49
- Pirofosfato de potássio						
Al_p	0,38	0,70	0,16	0,34	0,14	0,28
Fe_p	1,63	3,15	0,64	1,49	0,36	0,70
Al_p/Fe_p	0,23	0,22	0,25	0,23	0,39	0,40

O teor de micronutrientes disponíveis reflete as características da rocha matriz (basalto) e a localização dos pedons na paisagem. O solo G1, por situar-se na parte mais baixa do declive (pedoambiente mais úmido), estando mais sujeito a possíveis deposições de material proveniente das partes mais elevadas e tendo ambiente mais instável para a magnetita (fonte de elementos-traços), apresenta os maiores teores de micronutrientes.

A disponibilidade de P é baixa (1 ppm) provavelmente devido à alta capacidade de retenção de fosfatos, principalmente pelos óxidos de Fe e Al. Embora os teores de P_2O_5 sejam diferentes em todos os solos, a disponibilidade de P não segue uma proporção relativa. Este fato pode ser consequência da metodologia empregada, pois segundo FREIRE et alii (27), a menor capacidade de extração do extrator de Mehlich se deve, provavelmente, à maior especificidade de seus componentes para a forma de P ligada ao Ca, pouco encontrado nesses solos. De acordo com BAHIA FILHO (5), quando se usa o extrator de Mehlich há uma extração preferencial de P ligado ao Al em relação ao Fe. Tudo indica que a forma predominante nestes solos seja P ligado ao Fe, o que não está consonante com as conclusões de HSU (36) que encontrou que a maior parte do P fixado estava ligado ao Al. Além disso, segundo MOURA FILHO (52), os microagregados podem afetar a extração de P, sendo observado por este autor maior disponibilidade deste nutriente quando se usou amostras pulverizadas de material de solo.

Os dados relativos ao ataque sulfúrico (Quadro 4) evidenciam que todos os pedomateriais são ricos em óxidos de Fe e de

Al. A relação molecular $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ está acima de 1 apenas no G1, que contém mais sílica e é o mais caulinitico dos solos caracterizados (vide caracterização mineralógica-ATD).

Os teores de P_2O_5 são maiores no G6 que nos solos mais amarelados (G4 e G1). Esse fato é surpreendente, considerando que a goethita adsorve mais e desorve menos P, CURI (18) e BAHIA FILHO (6), e os solos mais amarelados estão em posição mais receptora. Fica a questão sobre até que ponto as diferenças de adsorção e desorção (que serão consideradas minuciosamente noutra seção) estariam relacionadas com esses teores originais diferentes.

Comparando-se as extrações de Fe e Al efetuadas na TFSA e na fração argila, observa-se que os valores de Al_d praticamente não variam nas duas frações, enquanto que para Fe_d , houve maior extração na TFSA que na fração argila, o que provavelmente está relacionado ao conceito do ponto de saturação das argilas para ferro livre, D'Hoore, citado por ESWARAN & SYS (22). Os valores de Al_o e Fe_o foram geralmente mais elevados na fração argila. Os valores de Fe_p foram superiores aos de Al_p , sendo que ambos os resultados (Fe_p e Al_p) obtidos para a fração argila foram aproximadamente duas vezes aqueles da TFSA. Este fato pode ter ocorrido pela presença de matéria orgânica coloidal, evidenciando maior atividade no G1 que nos demais solos, pelos valores mais elevados obtidos para o primeiro.

A relação Al_d/Fe_d é bem mais elevada nas amostras mais amareladas (G1 e G4), indicando maior intensidade da substituição de Fe por Al nos óxidos de Fe destes pedons, confirmada no estu

do da mineralogia desses solos.

A relação Al_0/Fe_0 atinge os maiores valores nos solos mais goethíticos (G1 e G4). Aparentemente existe, nesses solos, alguma película de compostos de Al de mais baixa cristalinidade (que possa ser extraída pelo oxalato), em comparação ao solo G6 (mais hematítico), GUALBERTO (28).

4.4. Caracterização mineralógica

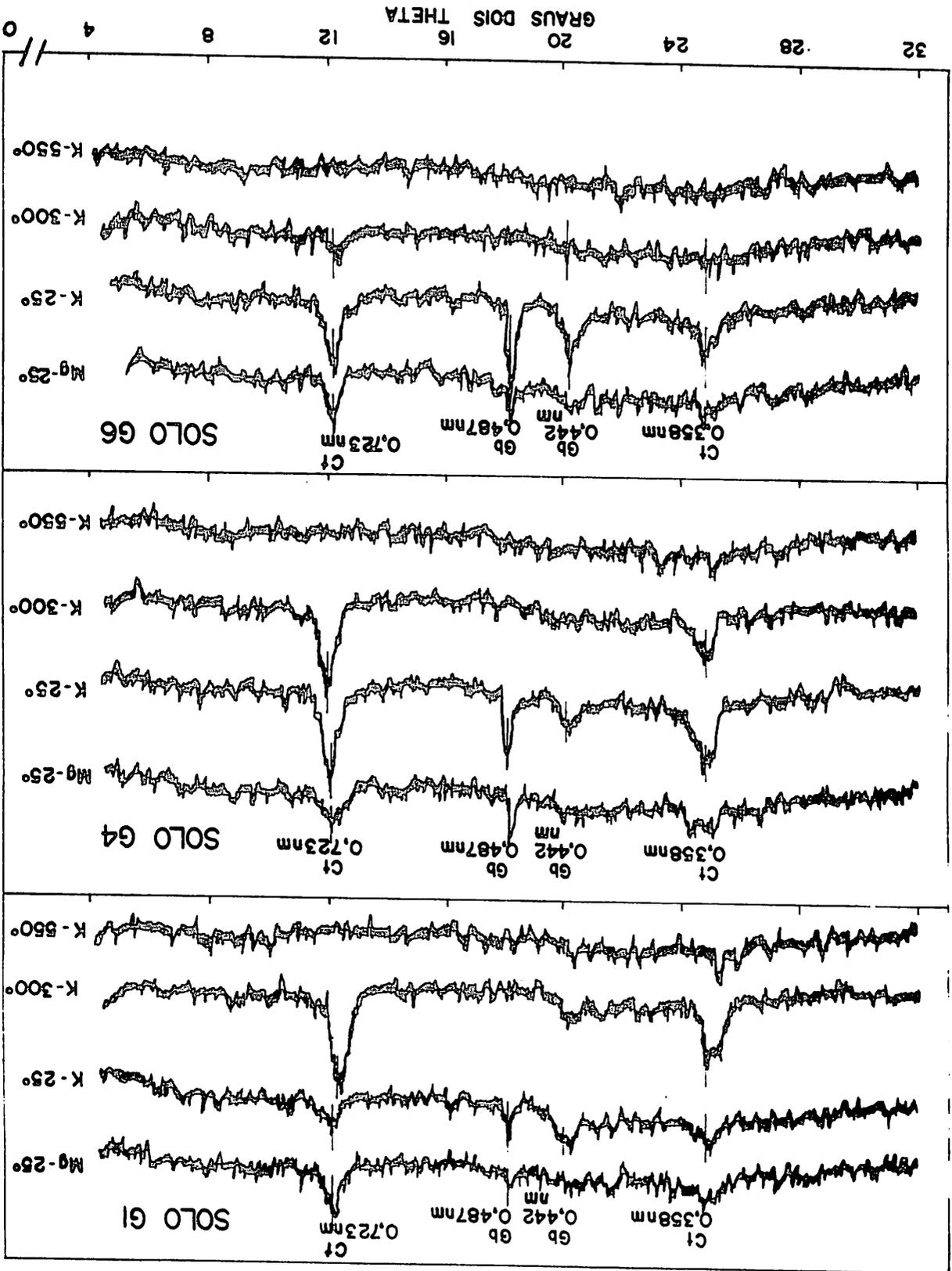
Análises de difração de raios X (DRX): os reflexos referentes aos minerais da fração argila, após tratamentos com DCB, são mostrados na Figura 2.

Pelos difratogramas obtidos, nota-se a predominância de caulinita e gibbsita em todos os casos. Os picos indicativos de gibbsita desapareceram no tratamento K 300°C e os de caulinita no K 550°C, conforme era de se supor.

Com relação à fração argila tratada com NaOH 5M, os difratogramas (Figura 3) mostraram uma dominância de goethita e hematita. O mineral anatásio (0,352 nm) e a goethita (0,413 e 0,242nm) foram identificados em todos os solos, enquanto a hematita (0,369 e 0,250 nm) nos solos G4 e G6.

Os reflexos que aparecem na Figura 3 podem ser usados para outras interpretações, tais como: dimensão média dos cristallitos, quantidade de substituição em Al e proporção relativa de minerais. No entanto, estas interpretações adicionais foram prejudi

FIGURA 2. Difractogramas de raios X da fração argila (amostras ori-
 entadas) do horizonte A de três Latossolos, membros de
 uma toposequência sobre basalto, do Planalto Central.
 Ct = caulinita; Gb = gibbsita.



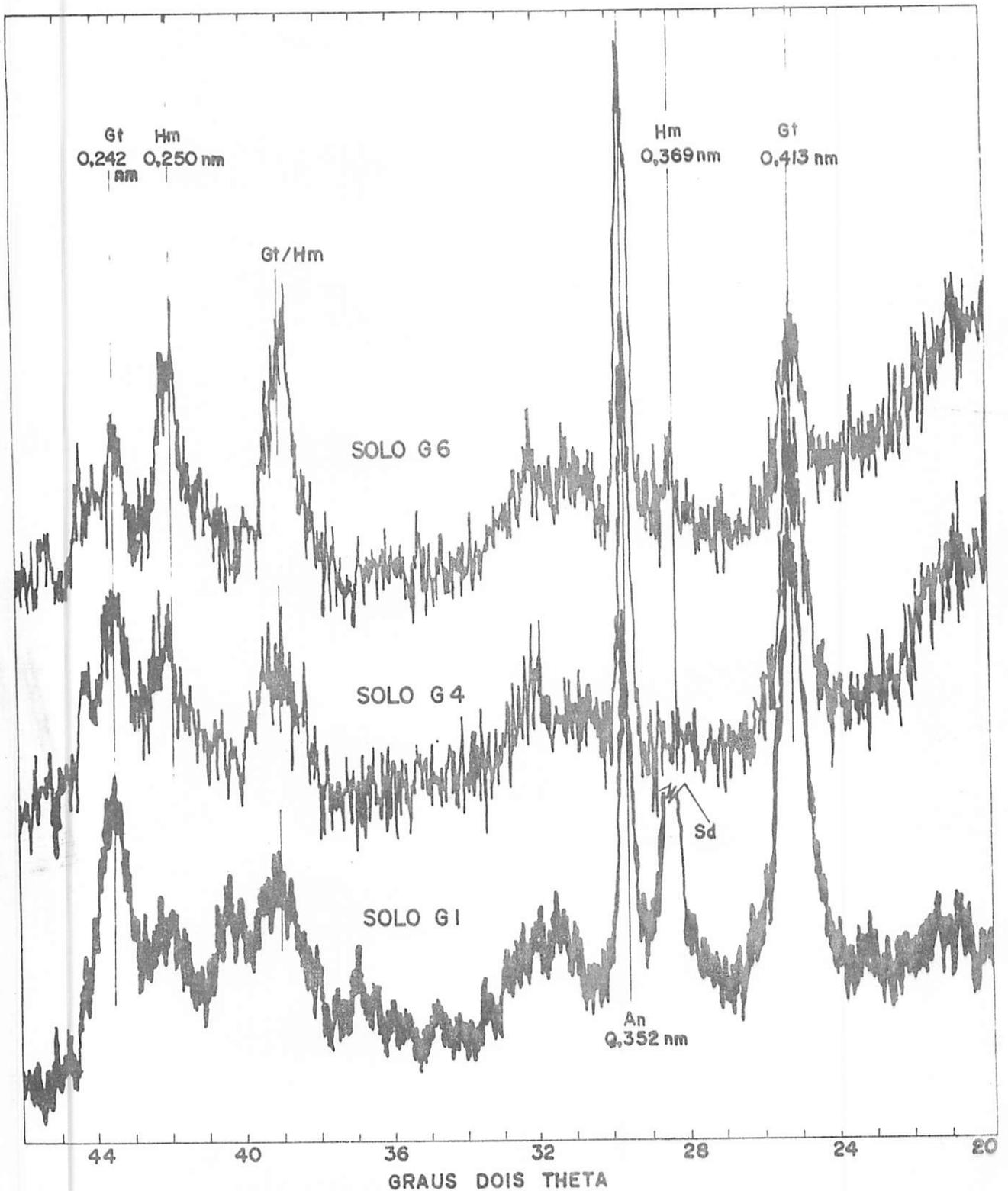


FIGURA 3. Difratoqramas de raios X da fração argila (método do pó) concentrada com NaOH 5M do horizonte A de três Latossolos, membros de uma toposequência sobre basalto, do Planalto Central. Gt = goethita; Hm = hematita; Sd = sodalita; An = anatásio.

cadado devido à dificuldade de se obter bons difratogramas pelo elevado teor de sodalita presente principalmente na amostra G1, tornando-se necessário repetir o tratamento com HCl 0,5M. Disso resultou uma redução no volume da amostra exigindo o uso de um suporte com orifício circular de área reduzida para análise pelo método do pó. Como consequência, houve diminuição da intensidade de difração impedindo a quantificação da hematita e da goethita. Entretanto, pode-se inferir que o solo G1 não tem hematita pela ausência dos picos característicos à 0,369 nm (o qual pode estar sendo ocultado pelo reflexo da sodalita) e à 0,25 nm e, devido às condições ambientais desfavoráveis à sua formação e, que, provavelmente o solo G4 tenha menos hematita que G6.

Pela dificuldade já mencionada, a dimensão média dos cristaltitos não pode ser estimada. No entanto, os valores de substituição em Al na goethita [29 (G1), 27 (G4) e 21 mol % Al (G6)] e na hematita [19 (G4) e 14 mol % Al (G6)], puderam ser determinados. Isto evidencia que, nestas pedocondições, a substituição em Al na estrutura da goethita é mais acentuada nos Latossolos mais amarelados (G1 e G4). Possivelmente, a razão dessa substituição mais intensa nos solos amarelados, se deva ao fato de que, à medida que o solo torna-se mais vermelho (G6), aumenta a possibilidade de formação de gibbsita que, por sua vez, consome Al da solução do solo durante seu processo de cristalização.

A ausência de hematita no solo G1 (10 YR), de acordo com CURTI (18), está relacionada com sua posição na paisagem, a qual favorece um ambiente mais úmido devido à movimentação de água en

costa abaixo, através de deflúvio e drenagem interna. Esta condição ambiental, provavelmente inibe a formação de hematita através de altas concentrações de compostos orgânicos que podem complexar o Fe liberado impedindo a formação da ferrihidrita, necessariamente um precursor da hematita, SCHWERTMANN & TAYLOR (80). Outra possibilidade seria a influência da paleodrenagem na gênese deste pedon (M. RESENDE, comunicação pessoal). Uma situação distinta tende a ocorrer na parte superior do declive, onde o grau de umidade mais baixo e o regime de C orgânico menos acentuado favorecem a desidratação da ferrihidrita, formando hematita, KÄMPF & SCHWERTMANN (41).

Análise térmica diferencial (ATD): os resultados da quantificação de caulinita e gibbsita pela ATD são mostrados no Quadro 5, enquanto que as curvas correspondentes para a fração argila dos solos estudados, são mostradas na Figura 4, onde a gibbsita é representada pelo pico endotérmico a 300°C e a caulinita a 525°C.

QUADRO 5. Teores de caulinita e gibbsita (%), determinados por ATD, na fração argila desferrificada.

Pedomaterial	Horizonte Bw*		Horizonte A	
	Caulinita	Gibbsita	Caulinita	Gibbsita
G1	42	6	52	20
G4	37	12	37	42
G6	22	22	32	45

* Resultados obtidos por CURI (18).

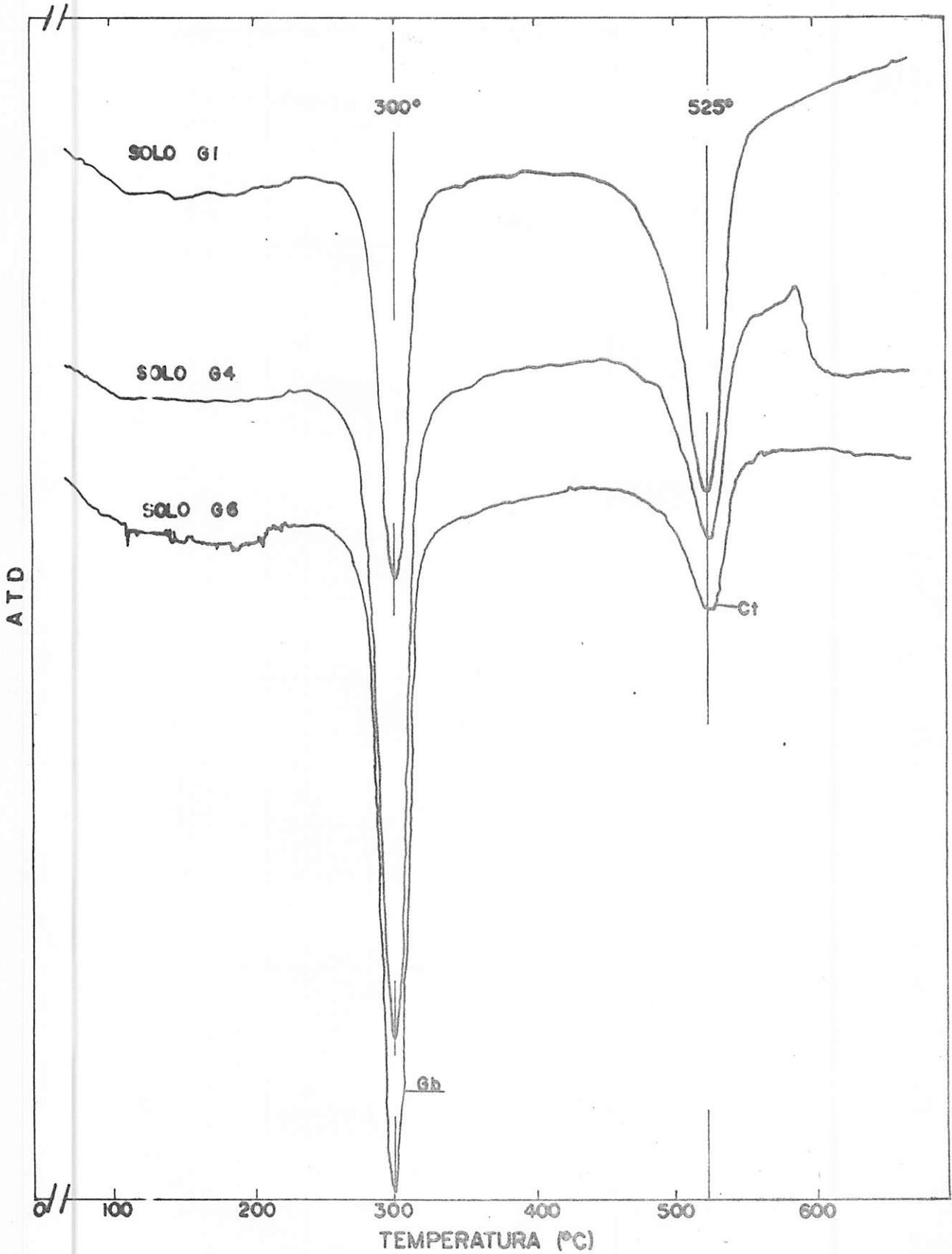


FIGURA 4. Curvas de Análise Térmica Diferencial (ATD) para o horizonte A de três Latossolos sobre basalto, do Planalto Central. Ct= caulinita; Gb= gibbsita.

Houve uma tendência do conteúdo de gibbsita aumentar em direção ao topo da paisagem, enquanto a caulinita mostrou uma tendência oposta. O movimento de sílica vertente abaixo e/ou perdas de sílica relativamente maiores nas posições mais elevadas da paisagem poderiam explicar tal comportamento diferencial. Além disso, o maior regime de matéria orgânica na porção inferior da paisagem favorece a formação de caulinita em relação à gibbsita.

Comparando-se os teores de Ct e Gb obtidos por CURI (18) para o horizonte Bw, com os do horizonte A, verifica-se grande variação destes teores, principalmente para a gibbsita. Acredita-se que estas variações provavelmente tenham ocorrido devido aos diferentes padrões empregados.

4.5. Estudos de adsorção e dessorção de P

- Adsorção de P: comparando-se os resultados de adsorção obtidos por CURI (18) para o horizonte Bw desta série de solos, com os do horizonte A, Quadro 6, nota-se a influência de outros fatores na capacidade adsorptiva de P, alterando a seqüência de adsorção previamente estabelecida. Os resultados encontrados mostram que a capacidade adsorptiva não seguiu a coloração, isto é, não foi reduzida com a diminuição da cor amarelada nos solos geotíticos. Provavelmente, a menor AMF verificada no solo G1 (10YR) comparada com a do solo G4 (5YR), tenha ocorrido em função do efeito da matéria orgânica, aumentando a carga líquida negativa do primeiro, MOTT (51), formando complexos estáveis com óxidos de Al e Fe, TISDALE & NELSON (82) e/ou bloqueando os sítios de adsorção

pelos produtos de sua degradação, FOX & KAMPRATH (25). Como pode ser observado no Quadro 2, o solo G4 possui menor teor de C orgânico e predominância de cargas positivas ($\Delta \text{pH} = + 0,4$). Segundo MOTT (51), embora se saiba que a goethita é carregada positivamente a valores de pH inferiores a 8,0-8,5, o teor de matéria orgânica pode governar a carga líquida em solos com predominância de cargas dependentes do pH.

A adsorção diferencial de P observada entre G1 e G4 impõe cautela nas generalizações a respeito da semelhança de comportamento inferida com base somente em cor e mineralogia dos óxidos de Fe.

Quando se compara o conjunto dos solos mais amarelados (G1 e G4) com o pedon mais avermelhado (G6), verifica-se que os primeiros sobrepõem o último em termos de adsorção máxima. A provável menor dimensão média dos cristalitos da goethita, a qual é mais abundante nos solos mais amarelados, do que aquela da hematita parece ser um dos fatores críticos para este comportamento diferencial. Outro fator poderia ser o mais alto conteúdo de Al extraído pelo DCB nos solos mais amarelados. Além disso, a área superficial específica do solo segue a mesma tendência (Quadro 2), como também a existência de películas de compostos de Al de mais baixa cristalinidade, inferida pelas relações Al_0/Fe_0 (Quadro 4), GUALBERTO (28).

Relativamente às classes de AMF sugeridas por CURI et alii (20) para Latossolos, verifica-se que apenas o horizonte Bw do solo G6 não se enquadrou neste esquema, devido ao seu teor de Fe_2O_3

do ataque sulfúrico ser superior a 24% (26,3%).

Acredita-se, no entanto, que outros fatores também possam estar influenciando a adsorção máxima de P dos solos estudados. Dentre estes, o teor de P_2O_5 "total" deve ser ressaltado como um dos possíveis responsáveis, pois a ordem decrescente desses valores ($G6 > G1 > G4$) corresponde à ordem crescente de AMF ($G6 < G1 < G4$), sugerindo que alguma interdependência esteja envolvida.

QUADRO 6. Valores de adsorção máxima de fósforo-AMF ($\mu\text{g/g}$) de uma topossequência de Latossolos do Planalto Central, antes (Co) e após calagem(Cl) e, de óxidos de Fe e, de silicatos e gibbsita.

Pedomaterial	Horizonte Bw*	Horizonte A			
		TFSA		Óxidos de ferro	Silicatos e gibbsita
		Co	Cl		
G1	2125	1975	2760	7310	1225
G4	2125(G3)	2500	3000	2280	1540
G6	1345	1500	1430	2850	1615

* Dados obtidos por CURI (18).

Os resultados apresentados no Quadro 6 mostram que os solos que receberam calagem, exceto o Latossolo Roxo (G6), apresentaram AMF maior que os não corrigidos. Estes resultados refutam a maioria dos trabalhos desta natureza, onde a calagem reduz a adsorção de P, aumentando sua disponibilidade para as plantas. No entanto, LEAL & VELLOSO (43) e WOODRUFF & KAMPRATH (87) mencionam que a calagem decresceu a AMF em solos com alta saturação de Al

trocável, mas teve pouco ou nenhum efeito em solos com baixa saturação deste íon. Todavia, os resultados encontrados estão de acordo com os obtidos por AMARASIRI & OLSEN (3), os quais sugerem que o fosfato adicionado foi inativado em uma maior extensão pelos hidróxidos de Fe e Al recentemente precipitados, formados pela adição da calagem do que pelos íons Fe e Al solúveis presentes no solo não corrigido. MURRMAN & PEECH (55) sugerem que a calagem pode decrescer a concentração de P em solução, porque este pode ser ocluído pela precipitação em massa de hidróxidos de Fe e Al.

Considerando-se os óxidos de ferro concentrados e, os silicatos e gibbsita como "sistemas puros", avaliou-se a contribuição desses constituintes mineralógicos no fenômeno adsorptivo de P, conforme mostra a Figura 5.

Comparando-se as curvas dos componentes da fração argila, verifica-se uma contribuição marcante dos óxidos de ferro na capacidade adsorptiva dos solos, uma vez que a forma de suas curvas sugere que o equilíbrio ainda não foi atingido, enquanto aquelas referentes aos silicatos e gibbsita já indicam tendência à estabilização.

- Dessorção de P: os resultados da quantidade de P liberado são mostrados no Quadro 7 e na Figura 6. Devido à baixa disponibilidade de P, a dessorção torna-se um passo limitante para a absorção deste nutriente pelas culturas e, o conhecimento do grau de reversibilidade das reações de adsorção é de grande significância agrônômica, CABRERA et alii (15). Por este motivo, procurou-se, neste estudo, estimar a dessorção não só do solo com um to

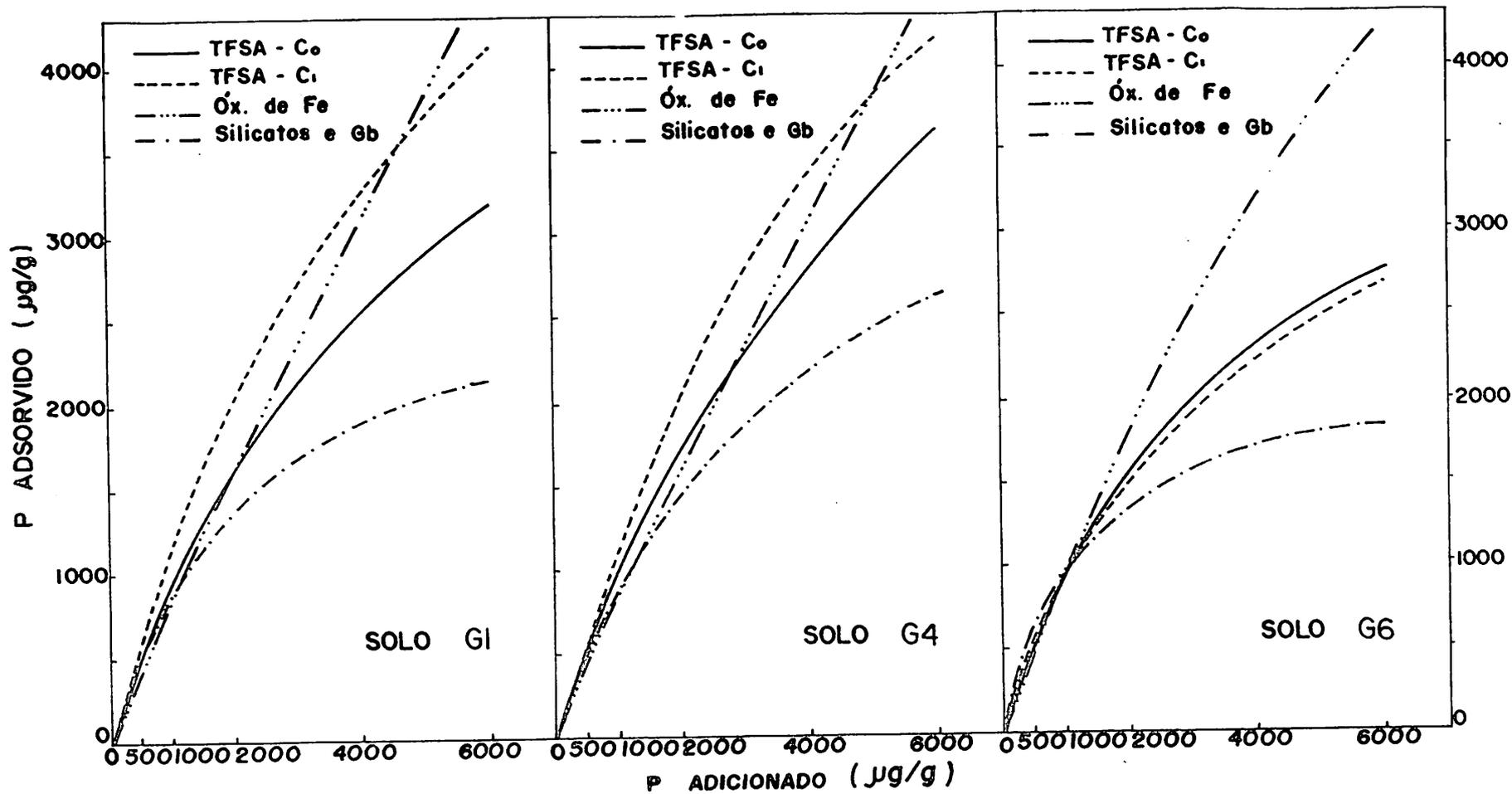


FIGURA 5. Quantidade adsorvida de P em função da quantidade adicionada nos materiais de solos (horizonte A) de uma topossequência de Latossolos do Planalto Central, antes e após a calagem e, nos óxidos de Fe e, silicatos e gibbsita.

QUADRO 7. Índice de dessorção de fósforo-IDF ($\mu\text{g/g}$) de uma topossequência de Latossolos do Planalto Central, antes e após calagem e, de óxidos de ferro e, de silicatos e gibbsita e, relação P dessorvido/P adsorvido (IDF/AMF) da TFSA na ausência e presença de calagem.

Pedomaterial	Horizonte Bw*	Horizonte A					
		TFSA		Óxidos de ferro	Silicatos e gibbsita	IDF/AMF	
		Co	Cl			Co	Cl
G1	11	7	25	41	94	0,004	0,009
G4	10(G3)	9	19	35	60	0,004	0,006
G6	22	34	39	27	49	0,023	0,027

* Resultados obtidos por CURTI (18).

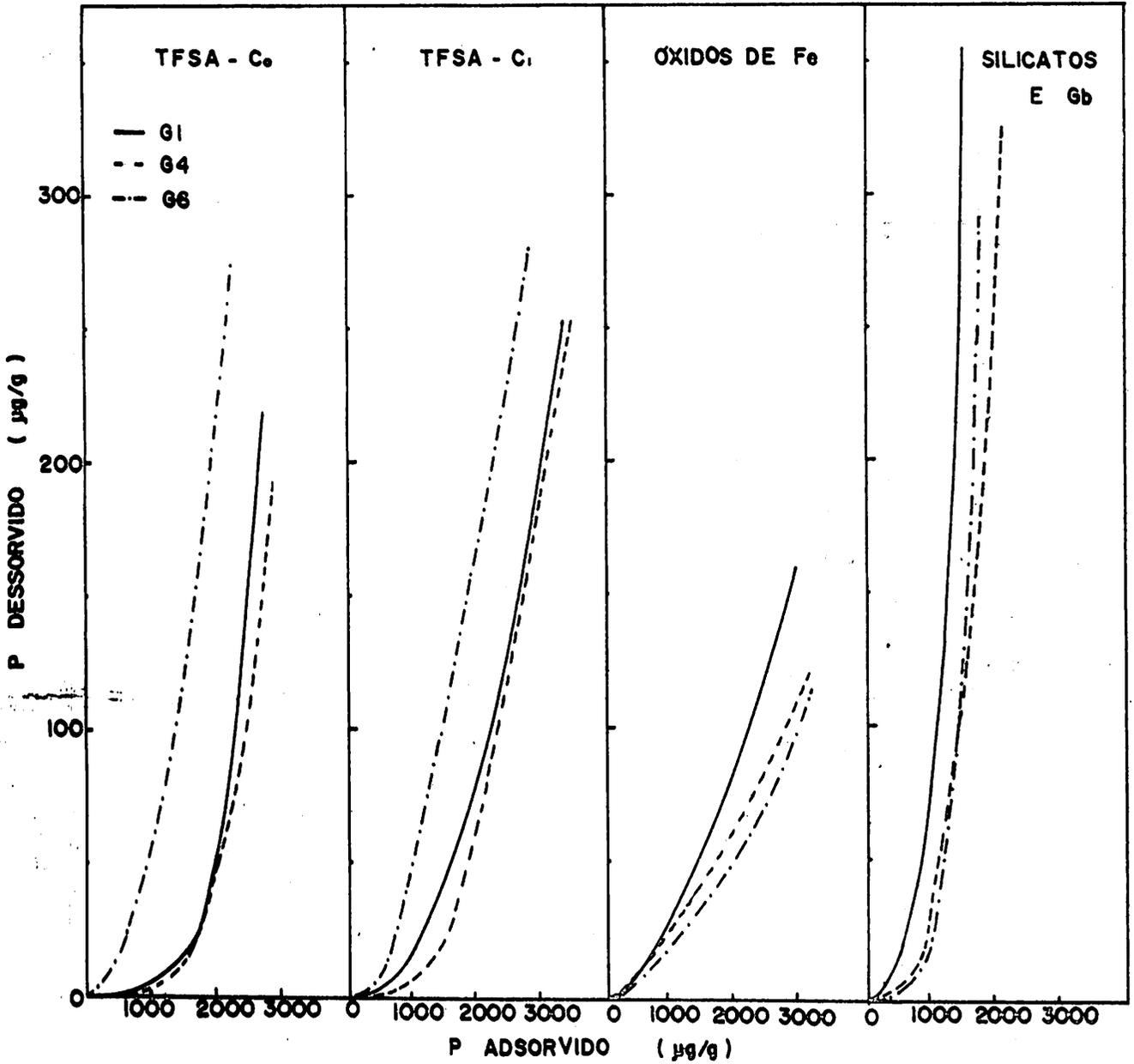


FIGURA 6. Isothermas de desorção de P dos pedomateriais sem calagem (C_o) e com calagem (C_i) e, dos componentes mineralógicos (óxidos de ferro e, silicatos e gibbsita) da fração argila de três Latossolos, membros de uma toposequência sobre basalto, do Planalto Central.

do, como também dos seus constituintes mineralógicos dominantes, representados, pelos óxidos de ferro e, pelos silicatos e gibbsita, visando conhecer um pouco mais acerca desse complexo processo.

Analisando-se os dados do Quadro 7 e a Figura 6, verifica-se que à semelhança do que ocorreu com a adsorção, existem dois conjuntos no que se refere à dessorção: aquele de solos amarelados (goethíticos) - G1 e G4 e, aquele representado pelo pedon avermelhado (mais hematítico) - G6. Como era de se supor, o primeiro conjunto liberou menos P por unidade de peso de solo, com uma correspondente menor relação IDF/AMF.

Os valores de dessorção foram relativamente baixos, corroborando com a natureza oxídica da argila nestes sistemas de solo. O solo G6, o mais avermelhado, também teve a menor taxa goethita/hematita, a menor magnitude de substituição em Al na goethita e o menor valor de área superficial específica. Aparentemente, estas propriedades influenciam a dessorção de P. A principal conclusão é que, neste ecossistema, os Latossolos mais amarelados (G1 e G4) adsorveram mais e dessorveram menos P do que o Latossolo mais avermelhado (G6).

A exemplo do que foi comentado para a AMF, os teores diferentes de P_2O_5 "total" poderiam estar influenciando os resultados encontrados para o IDF.

Embora a calagem tenha aumentado a adsorção nos solos G1 e G4, houve um efeito benéfico da mesma na dessorção destes solos com incrementos de 257% na liberação de P no solo G1 e de 111% no

G4. No Latossolo Roxo (G6), onde a calagem reduziu a adsorção, houve um aumento de apenas 15% na dessorção com esta prática.

Considerando-se os dois sistemas separadamente -óxidos de ferro e, silicatos e gibbsita, os óxidos de ferro apresentaram IDF consistentemente menor que os silicatos e gibbsita. Infere-se que a dessorção de P da goethita foi bem menor que da gibbsita. O comportamento mais reversível dos ânions adsorvidos na gibbsita sugere que os complexos de superfície entre Al^{3+} e ânions são mais lábeis do que aqueles entre Fe^{3+} e ânions, HINGSTON et alii (32).

Embora a obtenção dos óxidos de Fe concentrados e, dos silicatos e gibbsita, tenha permitido realizar um estudo de adsorção-dessorção comparativo entre estes dois sistemas, é oportuno ressaltar que o tratamento com NaOH 5M, em particular, é bastante drástico. Com isto, prevê-se alterações nas propriedades dos minerais, como por exemplo na sua área superficial específica, a qual poderia modificar o comportamento destes constituintes, alterando a dinâmica da sorção de P.

5. RESUMO E CONCLUSÕES

Amostras da camada superficial de três Latossolos, membros de uma topossequência sobre basalto, do Planalto Central do Brasil, foram coletadas, de acordo com sua posição na paisagem e coloração, com o objetivo de se identificar e caracterizar os componentes mineralógicos da fração argila e relacionar os parâmetros de sorção de fósforo com algumas características e propriedades dos solos.

Os materiais de solos foram caracterizados física, química e mineralogicamente, antes de se aplicar qualquer tratamento. Após a calagem, realizou-se um estudo detalhado, através do qual determinou-se a adsorção máxima de fósforo (AMF) e o índice de dessorção de fósforo (IDF), bem como a influência da calagem nestes parâmetros. Foram adotados dois níveis de calagem: nível zero (Co) sem calagem e nível um (Cl) com calagem para elevar o pH natural do solo a valores situados na faixa de 5,5 a 6,0. O nível Cl foi determinado através da curva de neutralização. Estudou-se a adsorção e dessorção na TFSA, sem e com calagem, nos óxidos de ferro concentrados e, nos silicatos e gibbsita, visando conhecer um pouco mais acerca desses complexos processos.

Diante dos dados obtidos, conclui-se que:

1. A assembléia mineralógica dominante na fração argila revelou uma íntima associação com a posição do solo na paisagem e sua coloração, isto é, hematita esteve associada à gibbsita no pedon mais avermelhado, situado no topo da paisagem, enquanto goethita esteve associada à caulinita nos pedons mais amarelados, localizados nas porções mediana e inferior do relevo.

2. Dentre os componentes mineralógicos da fração argila, os óxidos de Fe parecem ser os principais responsáveis pelas reações de sorção, sendo que os solos mais amarelados (G1 e G4) apresentaram maior poder adsorptivo e menor poder dessorptivo de P do que o pedon mais avermelhado (G6). A provável menor dimensão média dos cristalitos da goethita, a qual é mais abundante nos solos mais amarelados, do que aquela da hematita, o maior conteúdo de Al extraído pelo DCB, a maior área superficial específica e a existência de películas de compostos de Al de mais baixa cristalinidade nestes pedons mais amarelados, parecem ser os principais fatores críticos determinantes deste comportamento diferencial.

3. A adsorção diferencial de P observada dentro do conjunto de pedons mais amarelados (G1 e G4) impõe cautela nas generalizações a respeito da semelhança de comportamento inferida com base somente em cor e mineralogia dos óxidos de Fe, devido à complexidade do fenômeno de adsorção.

4. A calagem teve efeito diferencial nos solos estudados com relação à adsorção de P, maximizando este fenômeno nos solos mais goethíticos (G1 e G4) e o minimizando no pedon mais hematítico (G6); no entanto, a desorção foi incrementada em to dos os casos, sendo mais acentuada nos solos G1 e G4.

6. SUMMARY AND CONCLUSIONS

Samples from the top layer of three Oxisols, members of a toposequence over basalt, from the Central Plateau of Brazil, were collected according to their color and landscape position, aiming to identify and characterize the mineralogical components of the clay fraction and to relate the P-sorption parameters with some soil properties.

The pedomaterials were physically, chemically and mineralogically characterized, before any treatment. After liming, a detailed study was performed, through which the phosphorus adsorption maximum (PAM) and the phosphorus desorption index (PDI) were determined, as well as the liming influence upon these parameters. Two liming levels were adopted: level zero (C0) without liming, and level one (C1) with lime to raise the original soil pH to 5.5-6.0. The C1 level was determined by the neutralization curve. The adsorption-desorption studies were performed on the whole soil (< 2mm) with and without liming, on the concentrated iron oxide minerals, and on the silicates and gibbsite fractions, in order to learn more about these complex processes.

In light of the obtained data, the following conclusions can be made:

1. The dominant mineralogical assemblage in the clay fraction revealed a close association with soil color and landscape position, i.e., hematite was associated with gibbsite in the reddest pedon located in the summit position, while goethite was associated with kaolinite in the yellower pedons located in the medium and lower part of the landscape.

2. Among the minerals in the clay fraction, the Fe-oxides seem to be the major responsible ones for sorption reactions, and the yellower soils (G1 and G4) had higher adsorptive and lower desorptive power of P than the reddest pedon (G6). The probable smaller mean crystallite dimension of goethite, which is more abundant in yellower soils, that of hematite, the greater amount of DCB-extractable Al, the higher specific surface area and the existence of layers of Al compounds presenting lower crystallinity degree in these yellower pedons seem to be the main critical factors for this different behavior.

3. The different P adsorption observed between the yellower pedons (G1 and G4) imposes caution about generalizations concerning similar behavior inferred with basis only on color and iron oxides mineralogy, due to the adsorption phenomenon complexity.

4. Liming had variable influence on studied soils with relation to P adsorption, maximizing it on the more goethitic ones (G1 and G4) and minimizing it on the more hematitic pedon (G6) ;

however, the desorption was increased in all cases, being this effect more intense on soils G1 and G4.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABRUNA, F.; CHANDLER, J.V. & PEARSON, R.W. Effects of liming on yield and composition of heavily fertilized grasses and on soil properties under humid tropical conditions. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, 28(5):657-61 , Sept./Oct. 1964.
2. ALMEIDA NETO, J.X. & BRASIL SOBRINHO, M.O.C. Fixação de fósforo em três solos sob cerrado de Goiás. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, 1(1):12-5, jan./abr. 1977.
3. AMARASIRI, S.L. & OLSEN, S.R. Liming as related to P solubility and plant growth in an acid tropical soil. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, 37(5):716-21, Sept/Oct. 1973.
4. AWAN, A.B. Effect of lime on availability of phosphorus in Zamorano soils. Soil Science Society of America Proceedings , Madison, 28(5):672-4, Sept./Oct. 1964.

5. BAHIA FILHO, A.F.C. Fósforo em Latossolos do Estado de Minas Gerais: Intensidade, capacidade e quantidade de fósforo, P disponível e crescimento vegetal. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1977. 69p. (Tese MS).
6. _____. Índices de disponibilidade de fósforo em Latossolos do Planalto Central com diferentes características texturais e mineralógicas. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1982. 179p. (Tese de Doutorado).
7. _____ & BRAGA, J.M. Fósforo em Latossolos do Estado de Minas Gerais. III. Índices de disponibilidade de fósforo e crescimento vegetal. Experientiae, Viçosa, 20(8):217-34, out. 1975.
8. BARROW, N.J. Evaluation and utilization of residual phosphorus in soils. In: KHASAWNEH, F.E.; SAMPLE, E.C. & KAMPRATH, E. J. (eds). The role of phosphorus in agriculture. Madison, American Society of Agronomy, 1980. Cap. 13, p.333-59.
9. BASCOMB, C.L. Distribution of pyrophosphate-extractable iron and organic carbon in soils of various groups. Journal of Soil Science, Edinburg, 19(2):251-68, 1968.
10. BLAKE, G.R. Particle density. In: BLACK, C.A. (ed.). Methods of soil analysis. Madison, American Society of Agronomy, 1965. vol. 1, p.371-3.

11. BORGGAARD, O.K. The influence of iron oxides on the surface area of soil. *The Journal of Soil Science, Edinburg*, 33(3): 443-9, Sept. 1982.
12. BOUYOCOS, G.J. A recalibration of the hydrometer method for making mechanical analysis of soil. *Agronomy Journal, Madison*, 43:434-38, 1951.
13. BRAGA, J.M. & DEFELIPO, B.V. Relações entre formas de fósforo inorgânico, fósforo disponível e material vegetal em solos sob vegetação de cerrado. I. Trabalhos de Laboratório. *Ceres, Viçosa*, 19(102):124-36, mar./abr. 1972.
14. BRASIL. Ministério da Agricultura. Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado de São Paulo. Rio de Janeiro, 1960. 634p. (Boletim Técnico, 12).
15. CABRERA, F.; ARAMBARRI, P. de; MADRID, L & TOCA, C.G. Desorption of phosphate from iron oxides in relation to equilibrium pH and porosity. *Geoderma, Amsterdam*, 26:203-16, 1981.
16. CHANG, S.C. & JACKSON, M.L. Fractionation of soil phosphorus. *Soil Science, Baltimore*, 84:133-44, 1957.
17. CORONEL, I. & LÓPEZ-HERNANDEZ, D. Uso de la isoterma de adsorción para evaluar requerimientos de fósforo. III. Comparación con otros métodos. *Turrialba, San José, Costa Rica*, 31(4):313-7, Oct./Dic. 1981.

18. CURI, N. Lithosequence and toposequence of Oxisols from Goiás and Minas Gerais State, Brazil. West Lafayette, Purdue University, 1983. 158p. (PhD Thesis).
19. _____ & FRANZMEIER, D.P. Toposequence of Oxisols from the Central Plateau of Brazil. Soil Science Society of America Journal, Madison, 48(2):341-6, Mar./Apr. 1984.
20. _____; CAMARGO, O.A. de; GUEDES, G.A. de A. & SILVEIRA, J. V. Sorção de fósforo em materiais de Latossolos do Brasil Sudeste e Sul. Anais da III Reunião de Classificação, Correlação de solos e Interpretação da Aptidão Agrícola. EMBRAPA/SNLCS. Rio de Janeiro, 1986.
21. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura, 1979. (S.N.P.).
22. ESWARAN, H. & SYS, C. An evaluation of the free iron in tropical basaltic soils. Pedologie, XX:62-85, 1970.
23. FARINA, M.P.W.; SUMNER, M.E.; PLANK, C.O. & LETZSCH, W.S. Exchangeable aluminum and pH as indicators of lime requirement for corn. Soil Science Society of America Journal, Madison, 44(5):1036-41, Sept./Oct. 1980.

24. FISCHER, W.R. & SCHWERTMANN, U. The formation of hematite from amorphous iron (III) hydroxide. Clays and Clay Minerals, Clarkson, 23:33-7, 1975.
25. FOX R.L. & KAMPRATH, E.J. Phosphate sorption isotherms for evaluating the phosphate requirements of soil. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, 34(6):902-7, Nov. / Dec. 1970.
26. _____ & SEARLE, P.G. Phosphate adsorption by soils of the tropics. In: DROSDOFF, M. (ed.). Diversity of soils in the tropics. American Society of Agronomy, Madison, 1978. p.97-119.
27. FREIRE, F.M.; NOVAIS, R.F.; BRAGA, J.M.; FRANÇA, G.E.; SANTOS, H.L. & SANTOS, P.R.R.S. 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, Campinas, 3(2):105-11, maio/ago. 1979.
28. GUALBERTO, V. Caracterização física, química e mineralógica de alguns Latossolos, com altos teores de ferro, da Amazônia e do Planalto Central. Viçosa, UFV, 1984. 67p. (Tese MS).
29. GUEDES, G.A. de A. Effects of lime, P and water placement on corn responses and selected chemical properties of a Florida Ultisol. Gainesville, University of Florida, 1982. 210p. (PhD Thesis).

30. HARTER, R.D. Curve-fit errors in Langmuir adsorption maxima. Soil Science Society of America Journal, Madison, 48(4):749-52, July/Aug. 1984.
31. HEILMAN, M.D.; CARTER, D.L. & GONZALES, C.L. The ethylene glycol monoethyl ether (EMEG) technique for determining soil-surface area. Soil Science, Baltimore, 100:409-13, 1965.
32. HINGSTON, F.J.; POSNER, A.M. & QUIRK, J.P. Anion adsorption by goethite and gibbsite. II. Desorption of anions from hydrous oxide surfaces. Journal of Soil Science, London, 25(1):16-26, june, 1974.
33. _____; ATKINSON, R.J.; POSNER, A.M. & QUIRK, J.P. Specific adsorption of anions on goethite. Int. Congr. Soil Sci., Trans. 9 th (Adelaide, Australia), 1:669-78, 1969.
34. HOEFLICH, V.A. et alii. Sistema de produção agrícola no cerrado. In: FERRI, M.G., coord. SIMPÓSIO SOBRE O CERRADO, 4, Brasília, 1976. Bases para utilização agropecuária... Belo Horizonte, São Paulo, Itatiaia, EDUSP, 1977. p.37-58. (Reconquista do Brasil, 38).
35. HOFSTEE, B.H.J. On the evaluation of the constants V_m and K_m in enzyme reactions. Science, New York, 116(3013):329-31, Sept. 1952.

36. HSU, P.H. Adsorption of phosphate by aluminum and iron in soils. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, 28(4):474-8, July/Aug. 1964.
37. JONES, R.C. X-ray diffraction line profile analysis vs phosphorus sorption by 11 Puerto Rican Soils. Soil Science Society of America Journal, Madison, 45(4):818-25, July/Aug. 1981.
38. JUO, A.S.R. Mineralogical characteristics of Alfisols and Ultisols. In: THENG, B.K.G. (ed.). Soils with variable charge. Lower Hutt, New Zealand Society of Soil Science, 1980. p.69-86.
39. _____ & FOX, R.L. Phosphate sorption characteristics of some benchmark soils of West Africa. Soil Science, Baltimore, 124(6):370-6, Dec. 1977.
40. KAMPF, N. & SCHWERTMANN, U. The 5-M-NaOH concentration treatment for iron oxides in soils. Clays and Clay Minerals, Clarkson, 30(6):401-8, 1982.
41. _____ & _____. Relações entre óxidos de ferro e a cor em solos cauliniticos do Rio Grande do Sul. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, 7(1):27-31, jan./abr. 1983.

42. KARIM, M.I. & ADAMS, W.A. Relationships between sequioxides , kaolinite and phosphate sorption in a catena of Oxisols in Malawi. Soil Science Society of America Journal, Madison, 48(2):406-9, Mar./Apr. 1984.
43. LEAL, J.R. & VELLOSO, A.C.V. Adsorção de fosfato em Latossos sob vegetação de cerrado. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, 8(7):81-8, 1973. (Série Agronomia).
44. LOPES, A.S. & COX, F.R. A survey of the fertility status of surface soils under "cerrado" vegetation in Brazil. Soil Science Society of America Journal, Madison, 41(4):742-7 , July/Aug. 1977.
45. _____ & _____. Relação de características físicas, químicas e mineralógicas com fixação de fósforo em solos sob cerrado. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas , 3(2):82-8, maio/ago. 1979.
46. LÓPEZ-HERNANDEZ, D. & BURNHAM, C.P. The effect of pH on phosphate adsorption in soils. Journal of Soil Science, London, 25(2):207-16, June, 1974.
47. LUTZ, J.F.; PINTO, R.A.; GARCIA-LAGOS, R. & HILTON, H.G. Effect of phosphorus on some physical properties of soils. II. Water retention. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, 30(4):433-7, July/Aug. 1966.

48. MALAVOLTA, E. Elementos de nutrição mineral de plantas. São Paulo, Editora Agronômica Ceres, 1980. 254p.
49. McKEAGUE, J.A. & DAY, J.H. Aid in differentiating various classes of soils. Canadian Journal of Soil Science, Ottawa, 46:13-22, 1966.
50. MEHRA, O.P. & JACKSON, M.L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. Clays and Clays Minerals, Clarkson, 5:317-27, 1960.
51. MOTT, C.J.B. Anion and ligand exchange. In: GREENLAND, D.J. & HAYES, M.H.B. (eds.). The chemistry of soil processes. New York, John Wiley & Sons, 1981. Cap. 5, p.179-219.
52. MOURA FILHO, W. Studies of a Latosol Roxo (Eutrústox) in Brazil: clay mineralogy, micromorphology, effect on ion release, and phosphate reactions. Raleigh, North Carolina State University, 1976. 57p. (PhD Thesis).
53. MUNNS, D.N. & FOX, R.L. The slow reaction which continues after phosphate adsorption: Kinetics and equilibrium in some tropical soils. Soil Science Society of America Journal, Madison, 40(1):46-51, Jan./Feb. 1976.
54. MURPHY, J. & RILEY, J.P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. Analytica Chimica Acta, 27-31-6, 1962.

55. MURRMAN, R.P. & PEECH, M. Effect of pH on labile and soluble phosphate in soils. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, 33(2):205-10, Mar./Apr. 1969.
56. NISHIMOTO, R.K.; FOX, R.L. & PARVIN, P.E. Response of vegetable crops to phosphorus concentration in soil solution. Journal of America Society of Horticulture Science, Virginia, 102(6):705-9, Nov. 1977.
57. NOVAIS, R.F. & KAMPRATH, E.J. Fósforo recuperado em três extratores químicos como função do fósforo aplicado no solo e do "fator capacidade". Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, 3(1):41-6, jan./abr. 1979.
58. NORRISH, K. & TAYLOR, R.M. The isomorphous replacement of iron by aluminum in soil goethites. Journal of Soil Science, London, 12:294-306, 1961.
59. NYCHAS, A.E. & KOSMAS, C.S. Phosphate adsorption by Greek Alkaline Vertisols. Atenas, Grécia, Athens Faculty of Agriculture and Ministry of Agriculture, 1982. 31p.
60. OBIHARA, C.H. & RUSSEL, E.W. Specific adsorption of silicate and phosphate by soils. Journal of Soil Science, London, 23(1):105-17, Mar. 1972.
61. PARFITT, R.L. Phosphate adsorption on an Oxisol. Soil Science Society of America Journal, Madison, 41(6):1064-7, Nov./Dec. 1977.

62. PARFITT, R.L.; ATKINSON, R.J. & SMART, R. St.C. The mechanism of phosphate fixation by iron oxides. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, 39(5):837-41, Sept./Oct. 1975.
63. _____; FRASER, A.R.; RUSSELL, J.D. & FARMER, V.C. Adsorption on hydrous oxides. II. Oxalate, benzoate and phosphate on gibbsite. Journal of Soil Science, London, 28(1):40-7, Mar. 1977.
64. _____ & RUSSELL, J.D. Adsorption on hydrous oxides. IV. Mechanism of adsorption of various ions on goethite. Journal of Soil Science, London, 28(2):297-305, Mar. 1977.
65. QUAGGIO, J.A. Métodos de laboratório para determinação da necessidade de calagem em solos. In: RAIJ, B. van, et alii, coords. REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO, 15, Campinas, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1983. p. 32-48.
66. RAIJ, B. van. A capacidade de troca de cátions das frações orgânica e mineral em solos. Bragantia, Campinas, 28(8):85-112, mar. 1969.
67. RAJAN, S.S.S. & FOX, R.L. Phosphate adsorption by soils. II. Reactions in tropical acid soils. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, 39(5):846-51, Sept./Oct. 1975.

68. RESENDE, M. Mineralogy, chemistry, morphology and geomorphology of some soils of the Central Plateau of Brazil. West Lafayette, Purdue University, 1976. 237p. (PhD Thesis).
69. _____. & FRANZMEIER, D.P. Mineralogy of Brazilian Oxisols - A proposed general model. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1982. 2p.
70. RHUE, R.D. & HENSEL, D.R. The effect of lime on the availability of residual phosphorus and its extractability by dilute acid. Soil Science Society of America Journal, Madison, 47(2):266-70, Mar./Apr. 1983.
71. RUEGG, N.R. Modelos de variação química na província basáltica do Brasil Meridional. Características de teor, distribuição geográfica e diferenciação. São Paulo, Universidade de São Paulo, 1975. (Tese de Livre Docência). V.1 e 2.
72. RYDEN, J.C.; McLAUGHLIN, J.R. & SYERS, J.K. Mechanisms of phosphate sorption by soils and hydrous ferric oxide gel. Journal of Soil Science, London, 28(1):72-92, Mar. 1977.
73. SAMPLE, E.C.; SOPER, R.J. & RACZ, G.J. Reactions of phosphate fertilizers in soils. In: KHASAWNEH, F.E.; SAMPLE, E.C. & KAMPRATH, E.J. (eds). The role of phosphorus in agriculture, Madison, American Society of Agronomy, 1980. Cap.11, p.263-310.

74. SANCHEZ, P.A. Properties and management of soils in the tropics. New York, John Wiley and Sons, 1976. 618p.
75. _____ & UEHARA, G. Management considerations for acid soils with high phosphorus fixation capacity. In: KHASAWNEH, F. E.; SAMPLE, E.C. & KAMPATH, E.J. (eds). The role of phosphorus in agriculture, Madison, American Society of Agronomy, 1980. Cap. 17, p.471-514.
76. SCHALSCHA, E.B.; PRATT, P.F.; KINJO, T. & SMAR, J.A. Effect of phosphate salts as saturating solutions in cation exchange capacity determinations. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, 36(6):912-14, Nov./Dec. 1972.
77. SCHULZE, D.G. Identification of soil iron oxide minerals by differential X-ray diffraction. Soil Science Society of America Journal, Madison, 45(2):437-40, Mar./Apr. 1981.
78. SCHWERTMANN, U. Differenzierung der Eisenoxide des Bodens durch Extraktion mit Ammoniumoxalat-Lösung. Z. Pflanzenernäh., Bodenkunde, 105:194-202, 1964.
79. _____; FITZPATRICK, R.W.; TAYLOR, R.M. & LEWIS, D.G. The influence of aluminium on iron oxides. Part II. Preparation and properties of Al-substituted hematites. Clays and Clay Minerals, Clarkson, 27:105-112. 1979.

80. SCHWERTMANN, U. & TAYLOR, R.M. Iron oxides. In: DIXON, J.B. and WEED, S.B. (eds). Minerals in soil environments. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, 1977. p. 145-176.
81. 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, Madison, 44(3):500-5, May/June, 1980.
82. TISDALE, S.R. & NELSON, W.L. Soil fertility and fertilizers . 2.ed. New York, The Macmillan Company, 1966. 694p.
83. UDO, E.J. & UZU, F.O. Characteristics of phosphorus adsorption by some Nigerian Soils. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, 36(6):879-83, Nov./Dec. 1972.
84. VASCONCELOS, C.A.; BRAGA, J.M.; NOVAIS, R.F. & PINTO, O.C. B. Fósforo em dois Latossolos do Estado de Mato Grosso. III. Relações entre planta, solo e fósforo. Revista Ceres, Viçosa, 22(119):22-49, jan./fev. 1975.
85. VETTORI, L. Métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, Equipe de pedologia e fertilidade do solo, 1969. 24p.
86. WHITE, R.E. & TAYLOR, A.W. Effect of pH on phosphate adsorption and isotopic exchange in acid soils at low and high additions of soluble phosphate. Journal of Soil Science , London, 28(1):48-61, Mar. 1977.

87. WOODRUFF, J.R. & KAMPRATH, E.J. Phosphorus adsorption maximum as measured by the Langmuir isotherm and its relationship to phosphorus availability. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, 29(2):148-50, Mar./Apr. 1965.