

MARIA DO SOCORRO BEZERRA ARAÚJO

**FÓSFORO EM TOPOSSEQUÊNCIAS DE LATOSSOLOS E LUVISSOLOS  
DO SEMI-ÁRIDO DE PERNAMBUCO**

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

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2000

## **AGRADECIMENTO**

À Universidade Federal de Pernambuco, pela oportunidade de cursar o Doutorado.

À CAPES, pela concessão da bolsa, através do programa PICDT da UFPE.

Ao Departamento de Solos da UFV, aos coordenadores durante o curso, Prof. Liovando Marciano e Prof. Hugo Ruiz e a todo corpo docente e técnico do Curso de Solos e Nutrição de Plantas.

Aos professores Carlos Ernesto G.R. Schaefer e Everardo V.S.B. Sampaio, pela orientação segura.

Ao professor conselheiro Maurício Paulo Ferreira Fontes, pelas valiosas contribuições.

Ao professor José Mário Braga, que iniciou a orientação deste trabalho.

Aos professores Carlos Brayner e Antonino, respectivamente, chefe e vice-chefe do Departamento de Energia Nuclear da UFPE, pela ajuda em todas as ocasiões que se fizeram necessárias.

Ao José Coelho Araújo Filho e Manoel Batista Oliveira Neto, pesquisadores da Embrapa-Solos, pela valiosa ajuda na amostragem de campo.

Aos colegas do curso.

Aos estudantes Momade e Elaine, pelas análises de laboratório complementares.

Ao Departamento Solos da UFRPE, pela permissão de uso dos laboratórios.

A todos que, de uma forma ou de outra, colaboraram para o êxito deste trabalho.

## **BIOGRAFIA**

MARIA DO SOCORRO BEZERRA DE ARAÚJO, filha de Thales Araújo e Maria do Carmo Bezerra de Araújo, nasceu no Município de João Pessoa, Estado da Paraíba, no dia 30 de setembro de 1957.

Em agosto de 1980, graduou-se em Química Industrial e em agosto de 1983, graduou-se em Engenharia Química, pela Universidade Católica de Pernambuco, em Recife, Pernambuco.

Em abril de 1985, foi contratada pela Universidade Federal de Pernambuco, como Engenheira Química, onde permanece no cargo.

Em abril de 1989, concluiu o Curso de Mestrado em Ciências do Solo, na área de Fertilidade do Solo, pela Universidade Federal Rural de Pernambuco.

Em julho de 2000, concluiu o Curso de Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas, pela Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais.

## CONTEÚDO

	<b>Página</b>
RESUMO .....	vi
ABSTRACT .....	vii
1. INTRODUÇÃO GERAL .....	1
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	3
CAPÍTULO 1 .....	4
FÓSFORO EM TOPOSSEQUÊNCIAS DE LATOSSOLOS E LUVISSOLOS DO SEMI-ÁRIDO DE PERNAMBUCO. 1 – FRA- CIONAMENTO SEQUENCIAL .....	4
RESUMO .....	4
SUMMARY .....	5
1. INTRODUÇÃO .....	6
2. MATERIAL E MÉTODOS .....	9
2.1. Local .....	9
2.2. Amostragem e análises .....	10
2.2.1. Fósforo no material de origem .....	12
2.3. Análises estatísticas .....	12

	<b>Página</b>
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	13
3.1. Fósforo total .....	16
3.2. Frações de fósforo .....	18
3.3. Fósforo no material de origem .....	24
3.4. Análises de correlação .....	26
4. CONCLUSÕES .....	29
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	30
CAPÍTULO 2 .....	34
FÓSFORO EM TOPOSSEQUÊNCIAS DE LATOSSOLOS E LUVISSOLOS DO SEMI-ÁRIDO DE PERNAMBUCO. 2. BIO- DISPONIBILIDADE DAS FRAÇÕES .....	34
RESUMO .....	34
SUMMARY .....	35
1. INTRODUÇÃO .....	36
2. MATERIAL E MÉTODOS .....	39
2.1. Experimentos .....	39
2.2. Análises estatísticas .....	41
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	42
3.1. Experimento em casa de vegetação .....	42
3.2. Experimento com incubação .....	47
3.3. Análises de correlação .....	50
4. CONCLUSÕES .....	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	54
CAPÍTULO 3 .....	58
DESSORÇÃO DE FÓSFORO EM LATOSSOLOS E LUVIS- SOLOS DO SEMI-ÁRIDO DE PERNAMBUCO: MINERALOGIA E EFEITOS DE CICLOS DE UMEDECIMENTO E SECAGEM .....	58
RESUMO .....	58
SUMMARY .....	59

	<b>Página</b>
1. INTRODUÇÃO .....	60
2. MATERIAL E MÉTODOS .....	63
2.1. Experimento .....	63
2.2. Caracterização mineralógica .....	64
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	66
3.1. Mineralogia da fração argila .....	66
3.1.1. Latossolos .....	66
3.1.2. Luvisolos .....	68
3.1.3. Dessorção de fosfato .....	68
4. CONCLUSÕES .....	75
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	76

## RESUMO

ARAÚJO, Maria do Socorro Bezerra, D.S., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2000. **Fósforo em toposseqüências de Latossolos e Luvisolos do semi-árido de Pernambuco.** Orientador: Carlos Ernesto G.R. Schaefer. Co-orientador: Everardo Valadares de Sá Barretto Sampaio. Conselheiro: Maurício Paulo Ferreira Fontes.

Foram determinadas frações de fósforo em amostras de perfis de solo no terço superior, médio e inferior de três toposseqüências de Latossolos e três de Luvisolos, que são duas classes de solo agronomicamente importantes no semi-árido de Pernambuco. O fósforo foi medido mediante uma extração seqüencial que determinou as seguintes frações, com um grau de disponibilidade decrescente às plantas: fósforo mais disponível (extraível por resina trocadora de íons e por bicarbonato de sódio); fósforo menos disponível (extraível por hidróxido de sódio e ácido sulfúrico) e fósforo não-disponível (determinado por uma digestão a quente com ácido sulfúrico e peróxido de hidrogênio). A disponibilidade dessas frações para as plantas foi medida em um experimento com potes em casa de vegetação. A dessorção de fosfato aplicado também foi medida nesses solos, e as quantidades dessorvidas foram relacionadas à mineralogia e às quantidades de óxidos de ferro e alumínio.

## ABSTRACT

ARAÚJO, Maria do Socorro Bezerra, D.S., Universidade Federal de Viçosa, July 2000. **Phosphorus in Latosols and Luvisols toposequences of the semi-arid area of Pernambuco State.** Adviser: Carlos Ernesto G.R. Schaefer. Advising committee members: Everardo Valadares de Sá Barretto Sampaio and Maurício Paulo Ferreira Fontes.

Phosphorus fractions were determined in samples of soil profiles in the upper, medium and inferior thirds of three toposequences of Latosols and three of Luvisols that are two agronomically important soil classes in the semi-arid area of Pernambuco State. Phosphorus was measured using a sequential extraction that determined the following fractions, with a degree of decreasing availability to the plants: more available phosphorus (extractable by ion exchanger resin and sodium bicarbonate); less available phosphorus (extractable by sodium hydroxide and sulfuric acid) and no-available phosphorus (determined by a hot digestion with sulfuric acid and hydrogen peroxide). The availability of these fractions for plants was measured in an experiment carried out with pots at a greenhouse. The desorption of the applied phosphate was also measured in those soils, and the desorbed amounts were related to the mineralogy and to the amounts of iron and aluminum oxides.

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

O conhecimento das relações solo-planta nos ecossistemas tem um papel fundamental, em primeiro lugar, para separar as áreas que devem ser preservadas daquelas que são potencialmente produtivas e, em segundo, na escolha do manejo adequado das áreas produtivas. Entre os fatores importantes para o conhecimento dessas relações está o estudo da fertilidade dos solos. No nordeste brasileiro, o fósforo está entre os nutrientes de maior importância, não só devido a sua essencialidade às plantas, bem como à deficiência na maioria dos solos da região (OLIVEIRA et al., 1988; SAMPAIO et al., 1995).

A experiência brasileira no uso generalizado de fertilização fosfatada, como paradigma para elevadas produções (SANCHEZ, 1997), não tem se estendido à região semi-árida do nordeste, onde existem fortes limitações sócio-econômicas da pequena produção camponesa. Considerando a grande variabilidade de solos na região do sertão e a considerável riqueza química que possuem, classificando-os como eutróficos, RESENDE (1989) mostra relatos de agricultores que praticam agricultura de subsistência, afirmando que os solos de sua propriedade não poderiam ser cultivados continuamente, requerendo um tempo de pousio. Além disso, faltam estudos mais detalhados sobre fósforo nessa região. Uma das poucas contribuições é de AGBENIM e TIESSEN (1994), que estudaram as transformações de P em uma toposseqüência sobre rochas

sieníficas, muito pouco representativas do sertão nordestino.

Neste contexto, dada a necessidade de estudos para se avaliar mais precisamente o fósforo do solo nessas áreas, é importante que se determinem as várias formas – total, potencialmente disponível e disponível. O método de fracionamento seqüencial proposto por HEDLEY et al. (1982) vem sendo bastante utilizado para o acompanhamento das mudanças das formas de fósforo no solo (TIESSEN et al., 1984; ARAÚJO et al., 1993a, b; BALL-COELHO et al., 1993). Este método determina várias frações de fósforo no solo com grau decrescente de disponibilidade às plantas e as frações de P consideradas mais disponíveis têm apresentado, para solos em geral, boa correlação com o P absorvido pelas plantas. Além disso, permite medir as frações orgânicas, podendo, por isso, ser usado para acompanhar também transformações de P causadas por processos biológicos no solo.

Em áreas de clima semi-árido, onde freqüentemente ocorre relevo ondulado, os solos são bastante susceptíveis aos processos de erosão. Esses processos afetam a distribuição e a transformação das formas de P no perfil e ao longo da paisagem. Assim, variações na posição na vertente (terço superior, médio e inferior), podem representar o cenário mais real da distribuição e dinâmica de P no ecossistema semi-árido.

Os objetivos desse trabalho foram: i) quantificar e comparar as frações de fósforo no solo, determinadas por extração seqüencial, ao longo de toposseqüências de duas classes de solo, contrastantes entre si, uma contendo materiais muito intemperizados (Latosolos) e outra, materiais pouco intemperizados (Luvissolos), ambas representantes dos mais importantes solos agrícolas do semi-árido de Pernambuco; ii) determinar a biodisponibilidade dessas frações de P por meio de um experimento em casa de vegetação, e; iii) medir a adsorção de fosfato aplicado ao solo submetido a ciclos de umedecimento e secagem e relacioná-la com a mineralogia.

Esperam-se diferenças na distribuição das frações de fósforo em profundidade e ao longo da vertente, em função do regime de água distinto nas diversas posições, influenciando as transformações de fósforo. Além disso, espera-se uma maior concentração de fósforo lábil nas seqüências de solo menos desenvolvido (Luvissolos), devido a este apresentar mecanismo de retenção de fósforo ainda pouco desenvolvido.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGBENIN, J.O., TIESSEN, H. Phosphorus transformations in a toposequence of Lithosols and Cambisols from semi-arid northeastern Brazil. **Geoderma**, n.62, p.345-362, 1994.
- ARAÚJO, M.S.B., SALCEDO, I.H., SAMPAIO, E.V.S.B. Efeito de fertilizações fosfatadas anuais em solos cultivados com cana-de-açúcar. I. Intensidade e formas de acumulação. **Rev. Bras. Ci. Solo**, n.17, p.389-396, 1993a.
- ARAÚJO, M.S.B., SALCEDO, I.H., SAMPAIO, E.V.S.B. Efeito de fertilizações fosfatadas anuais em solos cultivados com cana-de-açúcar. II. Formas disponíveis e efeito residual do P acumulado. **R. Bras. Ci. Solo**, n.17, p.397-403, 1993b.
- BALL-COELHO, B., SALCEDO, I.H., TIESSEN, H., STEWART, J.W.B. Short and long-term phosphorus dynamics in a fertilized Ultisol under sugarcane. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, n.57, p.1027-1034, 1993.
- HEDLEY, M.J., STEWART, J.W.B., CHAUHAN, B.S. Changes in inorganic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, n.46, p.970-976, 1982.
- OLIVEIRA, L.B., SILVA, F.B.R., ALMEIDA, J.C., PARAHYBA, R.B.V., SÁ, R.F., LESSA, A.S.N. **Condições fito-edafoclimáticas do Nordeste. Parte III – Níveis de necessidade de calcário e de carências de potássio e de fósforo para solos do Nordeste do Brasil**. Recife: EMBRAPA-SNLCS. 1988.
- RESENDE, M. **Nordeste: Ambientes agrícolas, problemas e sugestões de pesquisa**. Mossoró: Fundações Guimarães Duque, 245p. 1989.
- SAMPAIO, E.V.S.B., SALCEDO, I.H., SILVA, F.B.R. Fertilidade de solos do semi-árido do Nordeste. In: PEREIRA, J.R., FARIA, C.M.B. (Eds). **Fertilizantes - insumos básicos para a agricultura e combate à fome**. Petrolina: EMBRAPA-CPATSA/SBCS, 1995. p.51-71.
- SANCHEZ, P.A. **Changing tropical soil fertility paradigms: from Brazil to Africa and back**. In: MONIZ, A.C. et al. (Eds). **Plant-soil interactions at low pH: Sustainable agriculture and forestry production**. Brazilian Soil Sci. Soc., 1997, p.19-28.
- TIESSEN, H., STEWART, J.W.B., COLE, C.V. Pathways of phosphorus transformation in soils of differing pedogenesis. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, n.48, p.853-858, 1984.

## **CAPÍTULO 1**

### **FÓSFORO EM TOPOSSEQUÊNCIAS DE LATOSSOLOS E LUVISSOLOS DO SEMI-ÁRIDO DE PERNAMBUCO. 1- FRACIONAMENTO SEQUÊNCIAL**

#### **RESUMO**

Para quantificar e comparar a distribuição das frações de fósforo no solo, entre pedopaisagens contendo materiais muito e pouco intemperizados, o fósforo do solo foi determinado por uma extração seqüencial em perfis do terço superior, médio e inferior de toposseqüências de Latossolos e Luvisolos do semi-árido de Pernambuco. As frações obtidas foram: fósforo extraído por resina (P-res); por bicarbonato de sódio, inorgânico e orgânico (Pi-bic e Po-bic); por hidróxido de sódio, inorgânico e orgânico (Pi-hid e Po-hid); por ácido sulfúrico (P-ác) e; por digestão peróxido/sulfúrica, P residual (P-rdu). Entre as classes de solo, o P total, calculado como a soma das frações, não apresentou diferenças marcantes, com médias de 320 e 350 mg kg<sup>-1</sup> nos horizontes A de Latossolos e Luvisolos, respectivamente. Entretanto, o P lábil (Pres+Pi-bic+Po-bic) diferiu significativamente e teve médias de 22 e 37 mg/kg<sup>-1</sup>, respectivamente. Entre os mesmos solos, não houve diferenças marcantes em relação à posição na encosta e, em geral, as frações apresentaram tendência de decrescer com a profundidade, principalmente as frações mais lábeis, em ambas as classes de solo. A fração Prdu, que é a menos lábil, foi bem similar ao longo do perfil, nas duas classes de solo. Proporcionalmente, a fração Prdu foi o maior reservatório e o P inorgânico lábil (Pres+Pi-bic) o menor, em todos os horizontes, nas duas classes de solo. A distribuição das demais frações diferiu entre horizontes, sendo o P orgânico (Po-bic+Po-hid) dominante nos horizontes mais superficiais e Pi-hid e P-ác nos subsuperficiais.

## SUMMARY

### PHOSPHORUS IN OXISOLS AND LUVISOLS TOPOSEQUENCES FROM SEMI-ARID PERNAMBUCO, NE-BRAZIL. I. SEQUENTIAL FRACTIONATION

The soil P was determined by a sequential extraction procedure in toposequences of Oxisols and Luvisols from the semi-arid Pernambuco, Brazil. The P fractions obtained were: resin extracted-P (res-P), inorganic and organic P extracted by Na-bicarbonate (bic-Pi and bic-Po), inorganic and organic P extracted by Na-hydroxide (hid-Pi and hid-Po), sulphuric-acid extracted P (ac-P) and, P measured by a sulphuric/peroxide digestion, residual P (rdu-P). The total P, calculated by the sum of all fractions was comparable in the two soils, with average of 320 and 350 mg kg<sup>-1</sup> in the Oxisols and Luvisols A horizons, respectively. However, the labile P (Pres+ Pi-bic +Po-bic) was significantly different with average values of 22 and 37 mg kg<sup>-1</sup> in the Oxisols and Luvisols, respectively. Into the same soil class there were little difference with reference to the slope position, in both soils. Overall, the P fractions tended to reduce downwards in the soil, notably the labile P. The least labile P (Prdu) was rather similar in the soil profile of both soils. The residual P was, proportionally, the highest pool and the inorganic labile P the lowest in all horizon for both soils. The contribution of organic P (Po-bic+Po-hid) was greater in the surface, whereas the Pi-hid and P-ac were dominant in subsurface. The P-ac amount and its proportion in relation to the total P suggest that both soils in this semi-arid region have a comparable weathering degree, with a relatively high P reservoir.

## 1. INTRODUÇÃO

A zona do sertão do Estado de Pernambuco, com uma área em torno de 60.000 km<sup>2</sup>, tem a agricultura como uma de suas principais atividades econômicas. A água é o fator mais limitante a essa atividade, devido a uma distribuição irregular das chuvas, muito concentradas num período curto de tempo, padrão característico da região. Entretanto, não é o único fator influenciando a produção. Os solos são bastante susceptíveis à erosão (SUDENE, 1983) e grande parte apresenta deficiência de nutrientes, principalmente fósforo (SAMPAIO et al., 1995). Apesar de existirem informações sobre respostas à aplicação de fertilizantes fosfatados em alguns locais da região (FARIA, 1992), em geral, a agricultura é praticada sem adubação, devido ao risco de perda das colheitas pela falta de chuvas e o medo do prejuízo se feita a aplicação, resultando em baixas produtividades em relação ao resto do país (IBGE, 1995). Além disso, faltam informações sobre a transformação do fertilizante fosfatado, com o tempo, nessa região.

Para se avaliar com mais precisão o fósforo do solo é importante que se determinem suas várias formas – a disponível, a potencialmente disponível e a total. O método de fracionamento de fósforo no solo, proposto por HEDLEY et al. (1982), tem se mostrado adequado para monitorar frações orgânicas e inorgânicas de P, mais e menos disponíveis (TIESSEN et al., 1984; TIESSEN et al., 1992; ARAÚJO et al., 1993a, b; BALL-COELHO et al., 1993; KAUFFMAN et al., 1993; AGBENIN e TIESSEN, 1994). Este

método determina várias frações de fósforo no solo com um grau decrescente de disponibilidade às plantas. As frações de P consideradas mais disponíveis têm apresentado para solos, em geral, boa correlação com o P absorvido pelas culturas. Além disso, o método permite medir as frações orgânicas, podendo, por isso, ser usado para acompanhar também transformações de P causadas por processos biológicos no solo. Existem alguns trabalhos no semi-árido nordestino que utilizaram este método para determinar fósforo no solo (TIESSEN et al., 1992; KAUFFMAN et al., 1993; AGBENIN e TIESSEN, 1994). Mas, em geral, informações mais detalhadas de fósforo para esta região são bastante escassas, principalmente em sistemas naturais.

O clima e a topografia estão entre os fatores mais importantes no movimento e transformação de nutrientes no solo (HONEYCUTT, 1986; KLEMMEDSON e WIENHOLD, 1991). Por influenciar os movimentos lateral e vertical de elementos no solo, esses dois fatores podem levar a diferentes padrões de distribuição de P no perfil e ao longo da paisagem, em diferentes ecossistemas. Assim, variações na posição da vertente (terço superior, médio e inferior), podem representar o cenário mais real da distribuição e dinâmica de P no ecossistema semi-árido. O estudo de toposseqüências de solo nestas áreas pode fornecer informações que podem auxiliar na avaliação de sua fertilidade: 1. porque a topografia influencia o teor de umidade do solo e permite que se estude um elemento em diferentes níveis de umidade, fator muito importante nas transformações de fósforo no solo. 2. Porque as variações de solos em posições topográficas diferentes podem representar diferentes níveis de intemperismo, possibilitando o estudo da evolução das formas do elemento com o grau de desenvolvimento do solo. 3. Porque possibilita avaliar a influência da erosão, determinando-se perdas ou acúmulos ao longo da vertente. Nas áreas mais baixas, esperar-se-ia uma concentração maior de fósforo total, devido ao aporte de material erodido de áreas mais altas. Por outro lado, a relação fósforo disponível/fósforo total dependerá das concentrações de Ca, Fe e Al, da umidade e da mineralogia do solo.

Com base no exposto, o objetivo deste trabalho foi quantificar e comparar a distribuição das frações de fósforo no solo, determinadas pelo

método da extração seqüencial proposto por HEDLEY, em perfis do terço superior, médio e inferior de toposseqüências de duas classes de solo, contrastando pedopaisagens contendo materiais muito intemperizados (Latosolos) com outras contendo materiais pouco intemperizados (Luvisolos), representantes dos mais importantes solos agrícolas do semi-árido de Pernambuco.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1. Local**

As áreas de estudo se localizam no semi-árido de Pernambuco, uma no município de Parnamirim, com seqüências de Luvisolos e outra no município de Santa Rita, com seqüências de Latossolos. Entre os perfis das seqüências de Luvisolos foi incluído um de Litólico, pelo fato destas classes estarem muito associadas no local, dificultando encontrar toda a seqüência de Luvisolos. As classes de solo escolhidas foram as mais representativas em termos de área de extensão e importância agrícola na região. Para minimizar a variabilidade proveniente do material de origem, as seqüências escolhidas foram associadas com rochas ou sedimentos similares, de acordo com o mapa geológico do Projeto RADAMBRASIL (BRASIL, 1983): biotita-gnaïsse para Luvisolos e sedimentos Quaternários para os Latossolos. Estes últimos estão relacionados com a rocha subjacente, de forma que os atributos pedológicos estão associados com as condições topográficas e o regime de água do solo. As precipitações médias anuais das áreas são de 585 mm para Santa Rita e de 580 mm para Parnamirim, com temperaturas médias anuais de 25,7°C para Santa Rita e 26,0°C para Parnamirim. A vegetação nos locais dos perfis selecionados, em ambas as áreas, era de caatinga nativa secundária, típica do semi-árido nordestino.

Numa das seqüências de Latossolos a área do perfil do topo vinha sendo cultivada há cerca de 15 anos, mas nunca tinha recebido fertilizante.

## 2.2. Amostragem e análises

Em cada área, foram escolhidas três toposseqüências de solo, amostrando-se perfis no terço superior, médio e inferior da vertente, em cada toposseqüência, totalizando nove perfis por área. As amostras de solo foram retiradas em todos os horizontes dos perfis. Todas as amostras de solo foram secas ao ar, destorroadas, passadas em peneira de 2 mm de malha e determinadas suas características físicas (granulometria, capacidade de campo e densidade aparente) e químicas (pH, Ca, Mg, K, Na, Al+H, C, P, Fe e Al). A granulometria foi determinada pelo método da pipeta (EMBRAPA, 1997); a capacidade de campo foi medida a 1/3 bar, com placa porosa (RICHARDS, 1954) e; a densidade aparente foi determinada pelo método da proveta (EMBRAPA, 1997). O pH foi medido em potenciômetro numa suspensão solo-solução de 1:2,5, em água (EMBRAPA, 1997). O cálcio, o magnésio, o sódio, o alumínio trocável e a acidez trocável ( $Al^{+++} + H^+$ ) foram determinados por extração com KCl 1 mol L<sup>-1</sup> e K<sup>+</sup> por extração com uma solução de Melich-1 (EMBRAPA, 1997); Ca<sup>++</sup> e Mg<sup>++</sup> foram medidos em espectrofotômetro de absorção atômica, K<sup>+</sup> e Na<sup>+</sup> em fotômetro de chama, Al<sup>+++</sup> e Al<sup>+++</sup> + H<sup>+</sup> por titulação, e H<sup>+</sup> por diferença entre Al<sup>+++</sup> + H<sup>+</sup> e Al<sup>+++</sup>. O carbono total foi determinado pelo método de digestão úmida e titulação (SNYDER e TROFYMOW, 1984). Ferro e alumínio, amorfo e cristalino, foram determinados pelo método do oxalato de amônio (SCHWERTMAN, 1964) e pelo do ditionito-citrato-bicarbonato (DCB) (MEHRA e JACKSON, 1960).

Subamostras desses solos foram passadas em peneira de 0,149 mm e submetidas ao fracionamento de fósforo pelo método de HEDLEY et al. (1982) modificado (ARAÚJO et al., 1993a) (Figura 1). Foram determinadas as seguintes frações de fósforo: P resina (P-res), extraída com tiras (7 x 1 cm) de resina trocadora de ânions (ANION 204UZRA); P inorgânico e P total bicarbonato (Pi-bic e Pt-bic), extraídas com bicarbonato de sódio 0,5 mol L<sup>-1</sup>; P orgânico bicarbonato (Po-bic), calculada por diferença entre

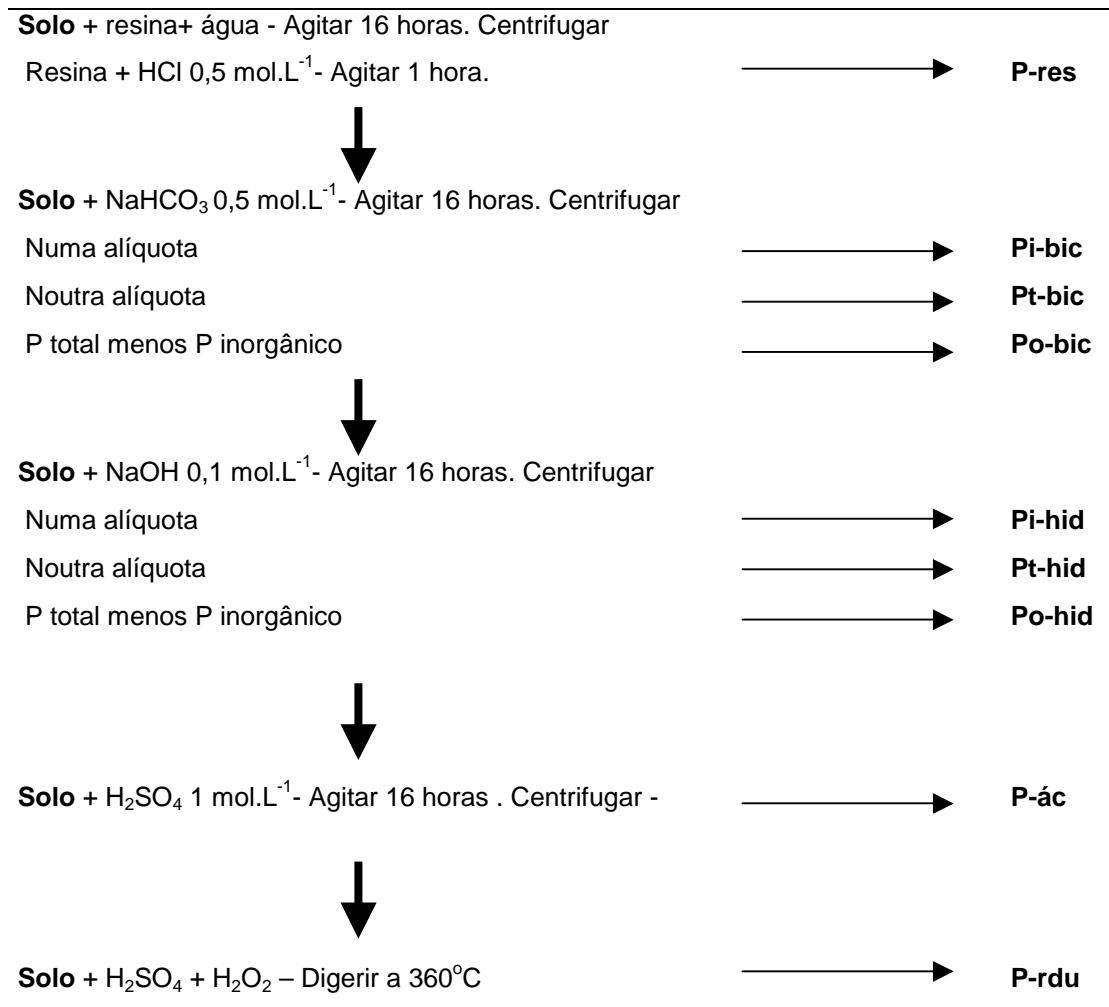


Figura 1 - Esquema do fracionamento seqüencial de P no solo de Hedley et al. (1982), modificado: P-res- fósforo extraído por resina; Pi-bic, Pt-bic e Po-bic, fósforo inorgânico, total e orgânico, extraído por bicarbonato de sódio; Pi-hid, Pt-hid e Po-hid, fósforo inorgânico, total e orgânico, extraído por hidróxido de sódio; P-ác- fósforo extraído por ácido sulfúrico e; P-rdu- fósforo residual, determinado por digestão.

Pt-bic e Pi-bic; P inorgânico e P total hidróxido (Pi-hid e Pt-hid), extraídas com hidróxido de sódio 0,1 mol L<sup>-1</sup>; P orgânico hidróxido, calculada por diferença entre Pt-hid e Pi-hid; P ácido (P-ác), extraída com ácido sulfúrico 1 mol L<sup>-1</sup> e P residual (Prdu), obtida por digestão com ácido sulfúrico concentrado e peróxido de hidrogênio, a 360°C. As alíquotas dos extratos para determinar as frações Pt-bic e Pt-hid, foram antes digeridas com ácido sulfúrico 12 N e persulfato de potássio, em autoclave a 127°C, durante 1 h. As frações extraídas estão seqüenciadas num grau decrescente de

disponibilidade às plantas (HEDLEY et al., 1982): a extraída por resina e bicarbonato são consideradas as mais lábeis; as extraídas por hidróxido, estão num grau menor de labilidade e inclui o P secundário associado a ferro e alumínio; a extraída por ácido inclui P-apatita e fosfatos de cálcio mais estáveis e; a determinada por digestão, é a mais resistente. Todas as determinações de fósforo foram feitas pelo método colorimétrico de MURPHY e RILEY (1962).

### **2.2.1. Fósforo no material de origem**

O material da rocha, coletado em todos os perfis dos Luvisolos, foi passado em peneira de 2 mm e submetido a uma digestão peróxido/sulfúrica, a 360°C (THOMAS et al., 1967). O fósforo foi determinado colorimetricamente.

### **2.3. Análises estatísticas**

Para comparações de médias entre horizontes e entre posições na vertente (terços superior, médio e inferior), dentro de cada classe de solo, e comparações entre classes de solos (Latosolos e Luvisolos), os dados foram submetidos a uma análise de variância utilizando o ANOVA e um teste de DMS. Uma matriz de correlação (correlação de Pearson) foi obtida entre as frações de fósforo e as propriedades químicas e físicas do solo. O programa estatístico usado foi o STATISTICA (STARTSOFT, INC., 1995).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

De forma geral, tanto as três toposseqüências de Latossolos quanto as três de Luvisolos apresentaram similaridade nas suas características químicas e físicas, entre posições correspondentes na toposseqüência, indicando uma relativa uniformidade dos sedimentos coluviais que deram origem aos Latossolos e do saprolito formado a partir de biotita-gnaïsse que deu origem aos Luvisolos. O fósforo total também foi relativamente similar nas três toposseqüências de cada área. Sendo o fósforo um elemento pouco móvel no solo, isto reforça a premissa da uniformidade do material de origem dos solos na área de estudo. Por isso, os dados serão apresentados como médias de cada posição (terço superior, médio e inferior), em cada área amostrada.

O pH, os cátions trocáveis e o carbono orgânico foram mais altos para os Luvisolos que para os Latossolos, como já era esperado, por ser o primeiro um solo menos intemperizado do que o segundo (Quadros 1 e 2). Entretanto, os Latossolos desta área mostraram-se bem menos evoluídos do que os Latossolos de área úmida, que, em geral, possuem valores de pH e concentrações de nutrientes menores (EMBRAPA, 1972, 1973). São Latossolos eutróficos, com saturação por bases na faixa de 69 a 92% (Quadro 1), justificada pelos longos períodos de estiagem ocorridos nessas áreas de clima seco.

Quadro 1 - Média dos valores das propriedades químicas e físicas de perfis de toposseqüências de Latossolos do semi-árido de Pernambuco

Horiz	pH	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	H <sup>+</sup>	Al <sup>+++</sup>	CTC	Ca/Mg	V	C	Fe ox	Fedit	Aldit	argila	silte	Areia f	Areia g	dens
		-----cmolc. kg <sup>-1</sup> -----								%	-----g.kg <sup>-1</sup> -----						g.cm <sup>-3</sup>		
<b>Terço superior</b>																			
<b>A</b>	6,02	1,98	0,30	0,08	0,50	0,40	0,10	3,36	6,50	85	7,8	0,02	13,75	0,96	152	182	308	358	1,51
<b>BA</b>	5,99	0,94	0,16	0,06	0,31	0,38	0,13	1,97	6,04	74	3,3	0,14	13,57	1,03	183	159	292	366	1,48
<b>Bw1</b>	5,74	0,67	0,16	0,05	0,24	0,36	0,14	1,63	4,21	69	2,2	0,03	15,56	1,12	239	139	303	319	1,54
<b>Bw2</b>	5,65	0,63	0,34	0,04	0,15	0,39	0,11	1,66	1,84	70	1,3	0,05	15,05	1,00	178	221	363	238	1,58
<b>Terço médio</b>																			
<b>A</b>	5,92	4,72	0,27	0,05	0,37	0,38	0,12	5,91	17,46	92	9,2	0,03	10,36	0,95	215	199	254	332	1,53
<b>BA</b>	5,65	2,03	0,12	0,06	0,34	0,48	0,27	3,29	17,16	77	3,4	0,08	8,21	0,81	225	123	320	332	1,49
<b>Bw1</b>	5,33	4,71	0,13	0,03	0,18	0,47	0,40	5,92	35,29	85	3,0	0,07	11,68	1,22	262	169	292	277	1,50
<b>Bw2</b>	5,21	4,83	0,20	0,09	0,12	0,44	0,26	5,95	23,57	88	2,2	0,06	13,56	1,15	295	161	272	272	1,51
<b>Terço inferior</b>																			
<b>A</b>	5,95	2,30	0,27	0,06	0,48	0,40	0,10	3,61	8,37	86	9,8	0,04	10,96	0,98	195	159	314	332	1,51
<b>BA</b>	5,81	1,71	0,26	0,06	0,35	0,48	0,22	3,07	6,61	77	5,3	0,10	10,06	1,05	288	118	271	323	1,50
<b>Bw1</b>	5,86	1,68	0,36	0,05	0,27	0,37	0,13	2,85	4,65	83	3,0	0,07	11,50	1,15	329	133	233	305	1,45
<b>Bw2</b>	5,32	1,34	0,40	0,11	0,18	0,35	0,25	2,63	3,31	77	2,0	0,04	12,28	1,03	338	134	262	266	1,48

V = saturação por bases; Fe-ox = ferro extraído por oxalato de amônio; Fe-dit e Al dit = ferro e alumínio extraído por ditonito, citrato e bicarbonato de sódio; areia f = areia fina; areia g = areia grossa; e dens. = densidade aparente.

Quadro 2 - Média dos valores das propriedades químicas e físicas de perfis de toposseqüências de Luvisolos do semi-árido de Pernambuco

Horiz	pH	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	H <sup>+</sup>	Al <sup>+++</sup>	CTC	Ca/Mg	Sat B	C	Fe-ox	Fe-dit	Al-dit	argila	silte	Areia f	Areia g	dens	
		-----cmolc.kg <sup>-1</sup> -----								%		-----g.kg <sup>-1</sup> -----						g.cm <sup>-3</sup>		
		<b>Terço superior</b>																		
<b>A</b>	6,39	8,65	1,56	0,13	0,75	0,54	0,06	11,68	5,53	95	13,5	0,08	11,84	0,72	97	304	305	294	1,43	
<b>Bt</b>	6,81	12,51	2,81	0,19	0,08	0,50	0,10	16,19	4,46	96	4,6	0,02	12,12	0,71	196	313	258	233	1,29	
<b>Cr</b>	6,71	16,31	5,04	0,41	0,06	0,51	0,09	22,43	3,24	97	2,7	0,01	12,29	0,79	181	299	220	300	1,25	
		<b>Terço médio</b>																		
<b>A</b>	6,38	12,96	2,23	0,12	0,61	0,54	0,06	16,53	5,82	96	16,1	0,00	12,77	0,80	130	310	267	293	1,27	
<b>Bt</b>	6,78	12,84	4,09	0,18	0,08	0,51	0,09	17,80	3,14	97	4,8	0,02	14,32	0,92	228	254	249	269	1,24	
<b>Cr</b>	6,40	12,55	6,33	0,39	0,07	0,63	0,24	20,21	1,98	96	3,1	0,06	11,41	0,74	137	223	256	384	1,28	
		<b>Terço inferior</b>																		
<b>A</b>	6,36	12,38	2,03	0,13	0,73	0,62	0,08	15,97	6,10	96	25,1	0,01	12,59	0,51	115	266	269	350	1,25	
<b>Bt</b>	6,50	13,32	3,65	0,10	0,16	0,53	0,08	17,83	3,65	97	7,8	0,00	13,84	0,91	193	243	240	324	1,30	
<b>Cr</b>	6,19	13,11	5,40	0,26	0,09	0,54	0,26	19,66	2,43	96	3,8	0,00	10,69	0,68	103	226	260	411	1,36	

Sat B = saturação por bases; Fe-ox = ferro extraído por oxalato de amônio; Fe-dit e Al dit = ferro e alumínio extraído por ditonito, citrato e bicarbonato de sódio; areia f = areia fina; areia g = areia grossa; e dens. = densidade aparente.

As concentrações dos elementos e os valores de pH foram maiores nos horizontes superficiais do que nos subsuperficiais, o inverso se dando para as concentrações de Al trocável. A relação Ca/Mg foi muito variável, mas em geral alta, chegando a atingir cerca de 35 para os Latossolos e seis para os Luvisolos. As concentrações dos elementos para os Luvisolos foram altas e comparáveis aos valores reportados para solos da região (EMBRAPA, 1972, 1973), estando de acordo com a classe de solo e o clima em que ocorrem.

O conteúdo de matéria orgânica em áreas de clima seco, em geral, é baixo, devido à vegetação escassa e ao baixo aporte de resíduos. O carbono orgânico, em geral, foi menor que  $10 \text{ g kg}^{-1}$  para os Latossolos e entre 3 e  $25 \text{ g kg}^{-1}$  para os Luvisolos (Quadros 1 e 2). Apesar da distribuição das chuvas ser similar nas duas áreas, os Luvisolos apresentaram teores de carbono um pouco mais altos que nos Latossolos, devido, possivelmente, ao maior reservatório de nutrientes, favorecendo a vegetação. Além disso, sendo os Luvisolos mais rasos que os Latossolos, acumulam menos água e sofrem o efeito da evaporação muito mais rapidamente. Possivelmente isto vai limitar a atividade decompositora dos microrganismos, refletindo num maior acúmulo de matéria orgânica no solo. Em ambas as classes de solo, a matéria orgânica apresentou uma tendência de aumento com a declividade, devido, provavelmente, a um maior acúmulo de água nas áreas mais baixas e arraste erosivo da parte superior. A granulometria apresentou pouca variação em relação à posição na vertente, caracterizando, em geral, solos de textura média para as duas classes de solo (Quadros 1 e 2).

### **3.1. Fósforo total**

As seqüências de Luvisolos mostraram concentrações de P total similares às da área de Latossolos (Quadros 3 e 4), com médias, no horizonte A, de  $320 \text{ mg kg}^{-1}$  para os Latossolos e de  $350 \text{ mg kg}^{-1}$  para os Luvisolos. Para os Latossolos, esses valores foram relativamente altos se comparados com Latossolos de área úmida, sob vegetação nativa (SHARPLEY et al., 1985; FRIESEN et al., 1997) e também foram mais altos ou similares quando comparados aos de área úmida que receberam

Quadro 3 - Média das frações de fósforo em amostras de solo de perfis de toposseqüências de Latossolos do semi-árido de PE

Horiz.	P-res	Pi-bic	Po-bic	Pi-hid	Po-hid	P-ác	Prdu	Ptotal	C/Po
----- mg . kg <sup>-1</sup> -----									
<b>Terço superior</b>									
<b>A</b>	7,9 a	7,2 a	6,5 a	47,5 a	57,8 a	40,2 a	224,3 a	391,4 a	122 b
<b>BA</b>	1,8 b	3,6 b	4,1 a	30,7 a	41,9 b	29,3 ab	202,5 a	313,9 a	73 b
<b>Bw1</b>	1,4 b	2,5 b	4,3 a	32,0 a	23,6 c	24,4 ab	207,4 a	295,4 a	77 b
<b>Bw2</b>	1,7 b	2,8 b	1,6 b	28,8 a	2,4 d	17,0 b	220,8 a	275,0 a	540 a
<b>Terço médio</b>									
<b>A</b>	10,3 a	7,7 a	5,5 a	37,1 a	60,4 a	32,1 a	109,0 a	262,1 a	140 a
<b>BA</b>	1,6 a	2,1 b	5,2 a	19,2 b	52,5 ab	17,5 a	108,5 a	206,5 a	58 a
<b>Bw1</b>	1,6 a	4,4 ab	3,5 a	24,9 b	37,2 bc	23,7 a	128,3 a	223,6 a	72 a
<b>Bw2</b>	1,6 a	3,4 b	1,9 a	26,0 b	16,7 c	19,7 a	150,1 a	219,4 a	178 a
<b>Terço inferior</b>									
<b>A</b>	6,9 a	7,9 a	5,9 a	45,2 a	77,8 a	32,1 a	128,1 a	303,8 a	119 a
<b>BA</b>	1,9 b	3,8 b	6,4 a	32,4 a	70,4 a	27,6 a	141,5 a	283,9 a	70 a
<b>Bw1</b>	1,6 b	4,5 ab	4,1 ab	34,6 a	36,7 b	26,0 a	161,1 a	268,7 a	73 a
<b>Bw2</b>	1,7 b	4,0 ab	2,7 a	28,9 a	12,96 b	18,0 a	169,1 a	237,3 a	160 a

Horiz. = horizontes; res = resina; i = inorgânico; o = orgânico; bic = bicarbonato; hid = hidróxido; ac = ácido; rdu = residual. Valores na coluna, para uma mesma posição na encosta, seguidos de letras minúsculas diferentes, diferem significativamente entre si pelo teste de DMS a 5%.

Quadro 4 - Média das frações de fósforo em amostras de solo de perfis de toposseqüências de Luvisolos do semi-árido de PE

Horiz.	P-res	Pi-bic	Po-bic	Pi-hid	Po-hid	P-ác	Prdu	Ptotal	C / Po
----- mg . kg <sup>-1</sup> -----									
<b>Terço superior</b>									
<b>A</b>	14,3 a	10,8 a	9,2 a	38,2 a	69,8 a	58,5 a	145,7 a	346,5 a	176 a
<b>Bt</b>	2,2 b	4,0 a	7,2 ab	14,0 a	31,7 b	24,8 a	144,6 a	228,3 ab	132 a
<b>Cr</b>	1,5 b	5,0 a	3,5 b	8,2 a	15,0 b	21,6 a	126,6 a	181,3 b	160 a
<b>Terço médio</b>									
<b>A</b>	16,7 a	10,9 a	10,5 a	35,6 a	60,0 a	68,9 a	129,6 a	332,3 a	226 a
<b>Bt</b>	1,2 b	4,9 b	5,5 b	16,6 ab	40,0 b	18,3 a	134,2 a	220,8 a	105 b
<b>Cr</b>	1,0 b	3,1 b	4,0 b	11,2 b	16,3 c	31,8 a	173,3 a	240,8 a	152 b
<b>Terço inferior</b>									
<b>A</b>	14,5 a	10,0 a	12,8 a	37,8 a	82,6 a	80,3 a	147,4 a	385,3 a	264 a
<b>Bt</b>	1,7 b	3,5 b	7,8 ab	16,4 b	46,8 b	40,0 b	139,0 a	255,2 b	156 a
<b>Cr</b>	2,1 b	3,6 b	5,5 b	13,1 b	22,3 b	64,1 ab	128,1 a	238,7 b	156 a

Horiz. = horizontes; res = resina; i = inorgânico; o = orgânico; bic = bicarbonato; hid = hidróxido; ac = ácido; rdu = residual. Valores na coluna, para uma mesma posição na encosta, seguidos de letras minúsculas diferentes, diferem significativamente entre si pelo teste de DMS a 5%.

fertilização (ARAÚJO e SALCEDO, 1997; SELLES et al., 1997). Em relação a outros tipos de solo da região semi-árida, mas em locais distintos, tanto os Latossolos como os Luvisolos tiveram concentrações mais altas, sendo cerca do dobro que os valores determinados numa área nativa, numa cultivada e fertilizada ou numa com quatro diferentes tempos de pousio (TIESSSEN et al., 1992). Houve apenas uma área nesta região semi-árida, sob vegetação nativa, que apresentou uma concentração de P total muito maior (AGBENIN e TIESSSEN, 1994), cerca de dez vezes mais, que as aqui determinadas para os Latossolos e Luvisolos. A concentração de P tão elevada do trabalho de AGBENIN e TIESSSEN deve-se, provavelmente e principalmente, ao material de origem sienítico, normalmente muito rico em fósforo, mas pouco representativo da região semi-árida.

Apesar de fósforo total ter sido similar entre Latossolos e Luvisolos, o fósforo lábil, somatório de P-res, Pi-bic e Po-bic, diferiu significativamente entre as duas áreas, no horizonte A. A média das concentrações de P lábil neste horizonte foi  $22 \text{ mg kg}^{-1}$  para os Latossolos e  $37 \text{ mg kg}^{-1}$  para os Luvisolos.

Em relação à posição na vertente, o P total não apresentou diferenças significativas nem nos Latossolos nem nos Luvisolos, indicando que a erosão atuou similarmente nas três posições, balanceando perdas e ganhos.

### **3.2. Frações de fósforo**

A concentração das frações de P, extraídas seqüencialmente, variou entre horizontes dentro do perfil, apresentando diferenças significativas em algumas frações, principalmente nas mais lábeis (Quadros 3 e 4). Já em relação à posição na vertente, as frações de fósforo não apresentaram diferenças significativas em nenhuma das áreas estudadas.

As frações inorgânicas incluem duas frações mais lábeis de P inorgânico, P-res e Pi-bic, e duas menos lábeis, Pi-hid e P-ác. As frações mais lábeis representaram muito pouco do P total. Somando as duas frações, elas variaram de 1 a 7,5%, nos Latossolos e de 1 a 8% nos Luvisolos, representando um reservatório muito pequeno em relação às outras frações (Figura 2a e b). Em termos absolutos, os baixos valores de P

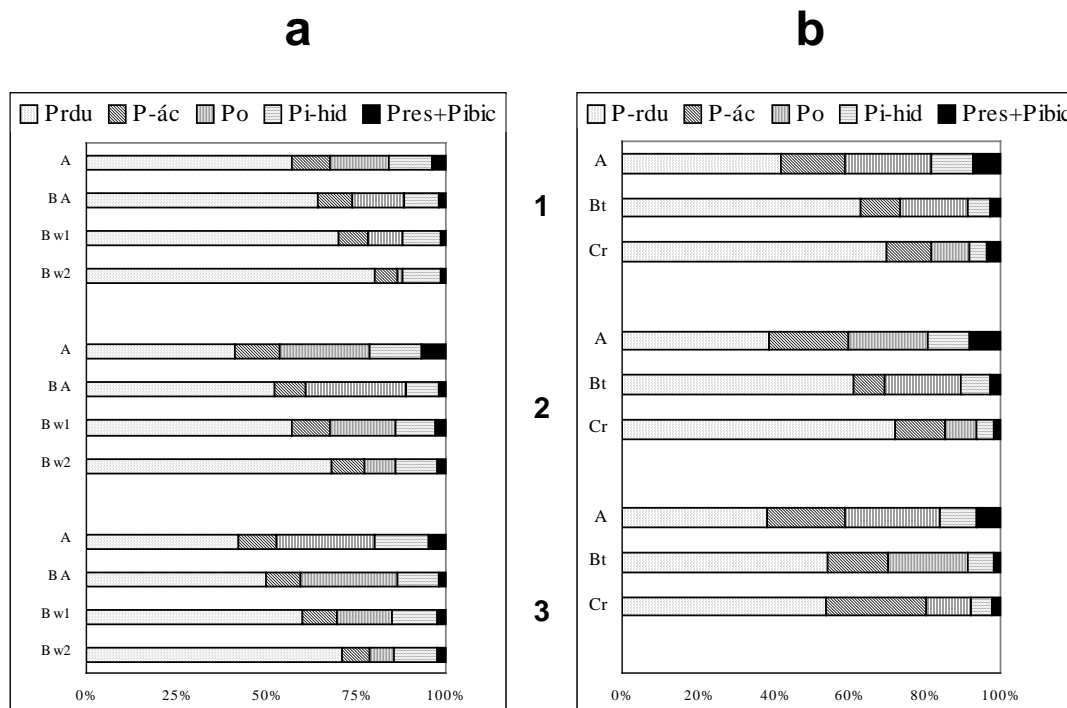


Figura 2 - Proporção das frações Prdu (P residual), P-ác (P-ácido), Po (P-orgânico, somatório de Po extraído por bicarbonato e por hidróxido de sódio), Pi-hid (P inorgânico extraído por hidróxido de sódio) e Pres+ Pi-bic (somatório de P inorgânico extraído por resina e por bicarbonato de sódio) em relação ao fósforo total, em perfis do terço superior (1), terço médio (2) e terço inferior (3) de toposseqüências de a) Latossolos e b) Luvisolos.

lável são muito similares aos encontrados para os solos de regiões úmidas (ARAÚJO et al., 1993; ARAÚJO e SALCEDO, 1997), porém abaixo dos encontrados para regiões temperadas (ROBERTS et al., 1985) e muito aquém dos valores atípicos para solos nesta mesma região semi-árida (AGBENIN e TIESSSEN, 1994). Em termos relativos, os valores foram bem similares aos dos dois últimos trabalhos citados, parecendo que o P inorgânico lábil mantém-se numa determinada faixa de proporções, definida por processos biológicos e geoquímicos do solo (COMPTON e COLE, 1998). Tanto o P-res como Pi-bic foram, em geral, significativamente maiores nos horizontes superficiais e similares nos mais profundos, nas duas classes de solo (Quadros 3 e 4).

A fração Pi-hid representou cerca de 10 a 16% do P total nos Latossolos e 5 a 11%, nos Luvisolos (Figura 2a e b). Entre as frações

inorgânicas, ela foi a maior fração extraída nos Latossolos e a terceira maior nos Luvisolos. Esses resultados são consistentes com os valores de Fe-ditionito desses solos, que foram um pouco mais altos nos Latossolos (Quadros 1 e 2). Em geral, nos Luvisolos, o Pi-hid foi maior nos horizontes A e nos Latossolos não apresentaram diferenças entre horizontes (Quadros 3 e 4).

A fração de fósforo ligado a cálcio, representada por P-ác, variou de 6 a 13% do P total, com valores levemente menores do que a fração Pi-hid, na área dos Latossolos. Como a fração Pi-hid está relacionada a Pi ligado a Fe e Al, isto sugere que a maior parte do fósforo inorgânico nestes solos, está, em proporções aproximadamente iguais, ligado a Ca e a Fe e Al, no estágio de intemperismo em que eles se encontram. Entretanto, se a fração P-ác representa de fato o fósforo de minerais primários, este resultado é incompatível com o grau de intemperismo de Latossolos, que deveria conter P inorgânico em maiores proporções ligado a Fe e Al, embora no caso do semi-árido, a ocorrência de P-Ca possa ser justificada pelas condições climáticas. É possível que o ácido sulfúrico esteja extraíndo outras formas de fósforo além do contido em minerais primários. Nos Luvisolos, P ligado a cálcio foi a maior fração extraída entre as frações inorgânicas, resultado esperado para esta classe de solo (WALKER e SYERS, 1976), e representou cerca de 8 a 27% do P total. Em relação à profundidade, na maioria dos casos, P-ác não apresentou diferenças significativas entre horizontes, mas houve uma tendência de ser maior na superfície (Quadro 4).

Os teores de ferro extraídos pelo ditionito (Fed), mostram valores considerados baixos nos Latossolos, entre 8,2 e 15,6 g kg<sup>-1</sup>, indicando o predomínio de formas de maior cristalinidade, apesar do baixo conteúdo de ferro livre (Quadro 1). Na posição de topo, os valores foram maiores, indicando maior grau de evolução. Nos terços médio e inferior das topossequências houve um decréscimo maior em superfície, indicando perda relativa de ferro ou efeito inibidor de matéria orgânica na cristalinidade (SCHWERTMAN, 1966). As relações Feo/Fed foram extremamente baixas (entre 0,01 e 0,008), ilustrando a absoluta dominância de óxidos de melhor cristalinidade (SCHWERTMAN, 1988).

Nos Luvisolos os valores de Fed foram, na maioria dos casos, mais altos do que os para Latossolos, com baixas relações Feo/Fed, à semelhança dos Latossolos, ilustrando a dominância de formas cristalinas, ainda que não abundantes (Quadro 2).

Em síntese, para ambas as classes de solo, os teores de ferro livre baixos, ainda que bem cristalizado, associados a solos de textura média e pouco tamponados (entre 15,2 e 33,8% de argila), denotam o papel menos acentuado, em termos absolutos, dos óxidos de Fe na adsorção de P nos solos, explicando a participação de Pi-hid nos Latossolos apenas levemente maior que a de P-ác.

A relação P-ác:Ptotal tem sido utilizada para estimar as reservas de P-apatita e outras formas de P-Ca, além da extensão das transformações dessas formas de P com o tempo (CREWS, 1996). Os valores desta relação calculados para os horizontes A, em todas as três posições estudadas, foram, em todos os casos, 0,1 para os Latossolos e 0,2 para os Luvisolos. A pequena variação desses valores entre as duas classes de solo sugerem que os Latossolos e os Luvisolos estão num estágio de intemperismo próximo e que, dada a magnitude da relação nas duas classes, parece que os Luvisolos são relativamente mais intemperizados e os Latossolos relativamente menos intemperizados para o esperado para estas classes de solo, ambos ainda com uma reserva de P de minerais primários. Essa proximidade no estágio de intemperismo entre as classes de solo é explicável: os Luvisolos são formados sobre um saprolito já pré-intemperizado, enquanto que os Latossolos sobre sedimentos pré-intemperizados, provenientes de áreas fontes onde se situam hoje os Luvisolos.

O fósforo orgânico inclui as frações Po-bic e Po-hid (Quadros 3 e 4). O Po-bic, a fração mais lábil entre as orgânicas, teve uma pequena contribuição no P total, até 3 % nos Latossolos e até 4% nos Luvisolos (Figura 2a e b). Já o Po-hid teve uma participação mais alta, mas muito variável, de 1 a 21 % para os Latossolos e 7 a 21% para os Luvisolos (Figura 2a e b). Embora tenham variado em proporções semelhantes nas duas classes de solo, em valores absolutos os Luvisolos apresentaram concentrações de P um pouco mais altas nestas frações (Quadros 3 e 4).

Nos Luvissolos, as concentrações dessas duas frações foram significativamente maiores nos horizontes superficiais (Quadro 4). Já nos Latossolos, essas frações ficaram mais concentradas no horizonte superficial e imediatamente subsuperficial, não apresentando, em quase todos os casos, diferenças significativas entre esses horizontes ao longo da vertente (Quadro 3). No caso específico da fração Po-bic, praticamente não houve diferenças significativas entre todos os horizontes, nas três posições, sugerindo um transporte de formas mais solúveis de fósforo orgânico para camadas mais profundas (FROSSARD et al., 1989), durante o período chuvoso, nesta classe de solo.

O Po-hid foi a fração que mais contribuiu para o fósforo orgânico extraível, tanto para os Latossolos como para os Luvissolos. Em valores absolutos, em geral, esta foi a segunda maior fração nas duas classes de solo. A fração orgânica tem sido um dos principais reservatórios de acumulação de fósforo em áreas sob vegetação nativa (CREWS, 1996; TIESSEN et al., 1992; HEDLEY et al., 1982), que é o caso destas áreas onde predomina a caatinga nativa secundária. Já em áreas cultivadas, continuamente fertilizadas, a acumulação tem ocorrido principalmente como Pi-hid (CONDRON e GOH, 1989; TIESSEN et al., 1992; ARAÚJO et al., 1993; BALL-COELHO et al., 1993; ARAÚJO e SALCEDO, 1997).

Apesar dos valores de P orgânico não apresentarem diferenças significativas em relação à posição na encosta, tanto o Po-bic como o Po-hid tenderam a aumentar com a declividade, acompanhando o padrão de comportamento da matéria orgânica, provavelmente com um reflexo da maior umidade nas posições mais baixas e do transporte de material vindo das posições mais altas, em ambas as classes de solo. No caso do Po-hid, essa tendência foi bem maior, com concentrações chegando a ser cerca do dobro no terço inferior em relação ao superior, nos Latossolos (Quadros 3). O P orgânico total, calculado como a soma de Po-bic e Po-hid, variou de 46 a 84 mg kg<sup>-1</sup>, nos Latossolos e de 39 a 95 mg kg<sup>-1</sup>, nos Luvissolos, nos horizontes superficiais e imediatamente subsuperficiais. Nas duas classes de solo, o Po contribuiu com até 25% do P total. É uma proporção relativamente alta se comparada a outras áreas de clima seco, onde sua contribuição tem sido em torno de 5% (LAJTHA e SCHLESINGER, 1988; AGBENIM e TIESSEN, 1994).

As relações C/Po, em horizontes A, foram significativamente mais altas nos Luvisolos (média de 222) que nos Latossolos (média de 127) (Quadros 3 e 4), onde o teor de matéria orgânica também foi maior (Quadros 1 e 2). Estas relações, em geral, não apresentaram diferenças marcantes entre horizontes. A maioria dos valores encontrados para os Latossolos é similar à faixa de valores encontrado para vários solos (FLOATES, 1965; UDO e OGUNWALE, 1977; WALKER e ADAMS, 1958). Já os valores encontrados para os Luvisolos foram mais altos, cerca do dobro, e em alguns casos, o triplo dos valores encontrados por esses autores. Mesmo comparado a alguns Luvisolos de clima temperado (ROBERTS et al., 1985; SCHOENAU e BETTANY, 1987), os Luvisolos do semi-árido apresentaram relação C/Po mais alta. Nos solos de semi-árido, os teores de matéria orgânica são mais baixos que nos de clima temperado, mas o P orgânico também é muito menor, resultando em maiores relações.

A fração mais estável, o P-rdu, representou cerca de 44 a 80% do P total, nos Latossolos e de 40 a 72% nos Luvisolos (Figura 2a e b). Embora sua participação no P total tenha sido variável, ela foi consistentemente o maior reservatório de fósforo do solo nas duas áreas (Quadros 3 e 4), confirmando estudos feitos em zonas secas de clima temperado (ROBERTS et al., 1985). Não houve diferenças significativas desta fração nem em relação à posição na encosta nem à profundidade, em qualquer das duas classes de solo. Entretanto, nos terços médio e inferior dos Latossolos e no terço médio dos Luvisolos, os valores tenderam a ser maiores nos horizontes mais profundos, quando esta tendência deveria ser o inverso, sendo a única fração que apresentou esse padrão (Quadros 3 e 4). A concentração do P residual tende a aumentar com o intemperismo (WALKER e SYERS, 1976), porque as transformações de fósforo com o desenvolvimento do solo levam à formação de compostos fosfáticos mais estáveis. Como o grau de intemperismo é maior nos horizontes mais superficiais, esperar-se-iam os maiores valores de Prdu nos horizontes superficiais, em qualquer das posições. É possível que exista P de minerais primários mais recalcitrante nos horizontes mais profundos, que só foi possível determinar após digestão e por isso, ficou incluído na fração P-rdu.

No caso dos Latossolos, o transporte de P em profundidade, sugerido pela proximidade dos valores das frações orgânicas ao longo do perfil, principalmente Po-bic, também pode ter contribuído. Esse transporte ocorreria por um mecanismo de lixiviação de compostos orgânicos de baixo peso molecular contendo P associado (FROSSARD et al., 1989), que seriam transformados em formas mais estáveis com o tempo (ADAMS e WALKER, 1975).

As altas proporções de Prdu nos Luvisolos podem indicar um grau de intemperismo mais acentuado que o esperado, fato anteriormente sugerido pela relação P<sub>ác</sub>/P<sub>total</sub>. De acordo com o modelo de WALKER e SYERS (1976), é incompatível, em termos de grau de intemperismo, existirem frações P-ác e Prdu altas ao mesmo tempo, porque o P de minerais primários (normalmente incluído no P-ác) é que alimenta as outras frações de P à medida que o solo evolui, até chegar na fração mais estável (Prdu). Nesse caso, pode estar incluído no Prdu parte do P de minerais primários que o ácido 1M não conseguiu extrair. Trabalhos mais antigos citam P-apatita incluído no P residual, que estaria envolvido por quartzo, tornando-o resistente à digestão prolongada com ácidos diluídos (FRY, 1913) e ao ataque com ácidos fortes (SYERS et al., 1967, 1968). Portanto, o P residual pode conter tanto fósforo de minerais secundários como também de minerais primários. Isso pode estar ocorrendo nos Luvisolos, justificando as altas proporções de P residual nessa classe de solo e as tendências de aumentos com a profundidade no terço médio. Os resultados apontam a importância das mudanças climáticas na compreensão dos fenômenos pedogenéticos atuais, desfazendo idéias pré-concebidas sobre a fertilidade dos solos do semi-árido.

### **3.3. Fósforo no material de origem**

Na área dos Luvisolos, também foi determinado o fósforo em amostras do material de origem (Figura 4). Ele foi maior nas posições mais baixas da encosta, com valores médios de 147, 253 e 349 mg kg<sup>-1</sup>, para os terços superior, médio e inferior, respectivamente. A distribuição das formas de fósforo seguiu um padrão consistente nas três posições da vertente,

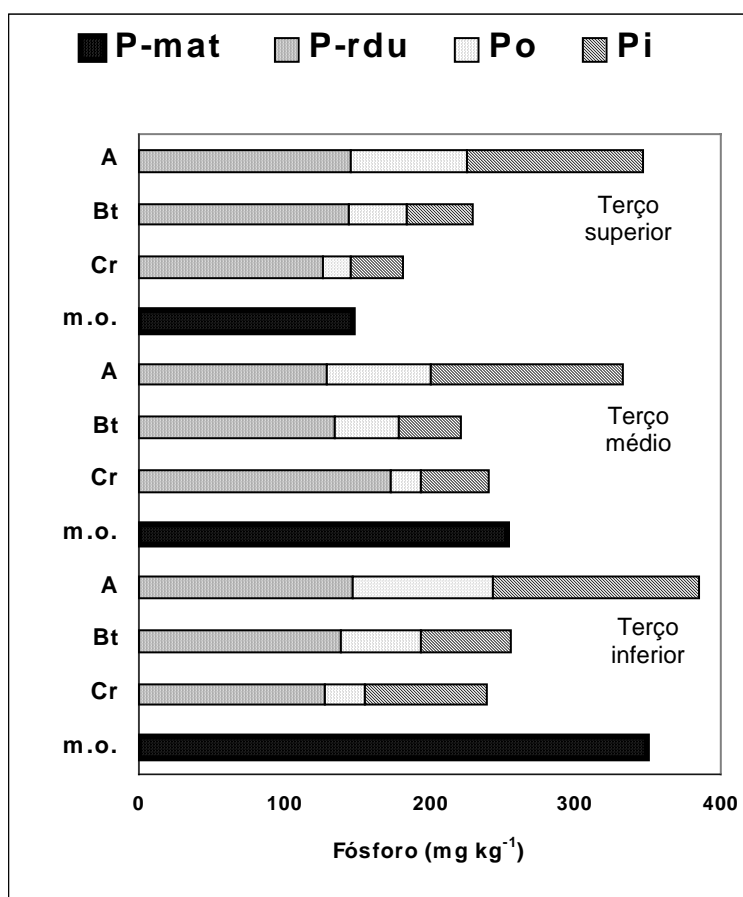


Figura 4 - Fósforo no material de origem (P-mat), fósforo residual -Prdu, fósforo orgânico - Po (Po-bic+Po-hid) e fósforo inorgânico - Pi (Pres+Pi-bic+Pihid+P-ác), em toposseqüências de Luvissolos do semi-árido de Pernambuco; m.o. - material de origem.

cujas concentrações foram menores com a profundidade. Em geral, P residual (Prdu) foi o maior reservatório de P, seguido de P inorgânico (Pi = Pres+ Pi-bic+Pi-hid+P-ác) e, por último P orgânico (Po= Po-bic+Po-hid). Nos horizontes A, o Prdu foi praticamente igual ao P inorgânico.

No terço superior, o P total (Pi+Po+Prdu) em todos os horizontes foi maior que o P da rocha (Figura 4). Já nos terços médio e inferior, isso ocorreu apenas no horizonte A. Como durante o processo de desenvolvimento do solo espera-se que haja uma perda de fósforo no sistema, os valores de P maiores em alguns horizontes do que no material da rocha pode ser justificado por um aporte externo. O fato de os valores maiores terem ocorrido principalmente nos horizontes superficiais indica que

provavelmente a erosão foi um dos responsáveis por estes aumentos, que foram 11, 30% e 140% em relação ao P da rocha, para os horizontes A dos terços inferior, médio e superior, respectivamente.

É interessante notar que apesar da concentração de P na rocha ser maior nas posições mais baixas (no terço inferior, o P-rocha foi cerca de duas vezes e meia o do terço superior) a distribuição das formas orgânica, inorgânica e residual em cada posição foram bem similares entre horizontes correspondentes.

### **3.4. Análises de correlação**

As correlações mais altas ocorreram entre as frações de P e potássio e entre estas e carbono. Embora as análises de correlação não expliquem relações de causa e efeito, deve-se considerar o fato de que essas correlações com K e C foram positivas, altamente significativas ( $p < 0,01$ ) e ocorreram com todas as frações de P, exceto Prdu, nas duas áreas estudadas (Quadros 5 e 6). Uma hipótese para este fato é a matéria orgânica e compostos fosfáticos contendo K estarem sendo fontes de fósforo para quase todas as frações de P. É sabido que a matéria orgânica pode ser uma fonte lábil de fósforo, após sua decomposição e mineralização do P orgânico (WALKER e ADAMS, 1958; CONDRON e GOH, 1990; TIESSSEN et al., 1992). Entretanto, o grau de suprimento para as diversas frações de fósforo, provavelmente deve ser mais em função da taxa de ciclagem desse reservatório de P do que do seu tamanho (CREWS, 1996; TIESSSEN et al., 1992). No caso de K, em particular, há informações sobre a formação de um fosfato de Al e K, a taranakita potássica ( $H_6K_3Al_5(PO_4)_8 \cdot 18H_2O$ ), em ambientes onde a concentração de potássio é elevada (TAYLOR e GURNEY, 1965; JACKSON, 1969; WILD, 1988). TAYLOR e GURNEY (1965), em experimentos de laboratório, observaram a formação da taranakita como um dos principais produtos e concluíram que, na ausência de fertilização, o potássio nativo precipita como taranakita e o resto do fosfato forma fosfatos de cálcio, alumínio e ferro. A taxa e a extensão das reações de formação desses fosfatos vai depender da quantidade de alumínio reativo e do conteúdo de água no solo (TAYLOR e GURNEY,

Quadro 5 - Correlações entre frações de fósforo e algumas propriedades selecionadas de Latossolos do semi-árido de PE (\*p < 0,05; \*\*p < 0,01)

	Pres	Pi-bic	Po-bic	Pi-hid	Po-hid	P-ác	Prdu
pH				0,48**	0,37*	0,46**	
Ca	0,38*	0,34*					-0,36*
Mg				0,56**		0,42*	0,37*
K	0,48**	0,55**	0,68**	0,62**	0,65**	0,49**	
C	0,69**	0,74**	0,70**	0,60**	0,84**	0,54*	
Fe-dit						0,52**	0,66**
P-lábil				0,56**	0,63**	0,45**	

res = resina; i = inorgânico; o- orgânico; bic = bicarbonato; hid = hidróxido; ac = ácido; rdu = residual; P-lábil = (P-res+Pi-bic+Po-bic); Areia g. = areia grossa; Fe-dit = ferro extraído por ditionito, citrato e bicarbonato de sódio.

Quadro 6 - Correlações entre frações de fósforo e algumas propriedades selecionadas Luvisolos do semi-árido de PE (\*p < 0,05; \*\*p < 0,01)

	Pres	Pi-bic	Po-bic	Pi-hid	Po-hid	P-ác
pH	-0,38*					-0,47*
Na			-0,39*		-0,52**	
Ca		-0,39*		-0,42*		
Mg	-0,47*	-0,55**	-0,52**	-0,50**	-0,59**	
K	0,74**	0,67**	0,66**	0,69**	0,81**	0,50**
C	0,76**	0,69**	0,87**	0,68**	0,75**	0,45*
P-lábil				0,93*	0,64**	0,68**

res = resina; i = inorgânico; o- orgânico; bic = bicarbonato; hid = hidróxido; ac = ácido; rdu = residual; P-lábil = (P-res+Pi-bic+Po-bic); Areia g. = areia grossa; Fe-dit = ferro extraído por ditionito, citrato e bicarbonato de sódio.

1965). É possível que, nesses solos do sertão, além de fosfatos de Ca, Fe e Al, possa estar sendo formado também o fosfato de Al e K. A taranakita tem sido considerada uma fonte moderadamente efetiva de fósforo em solos ácidos, tendo sua eficiência aumentada com o tempo de permanência no solo (TAYLOR et al., 1963).

Outras correlações positivas e altamente significativas (p<0,01), porém mais baixas, ocorreram com pH e Fe-dit e apenas algumas frações

de fósforo, nos Latossolos (Quadro 5) e negativas com Mg e Na, nos Luvisolos (Quadro 6).

As análises de correlação também têm sido usadas entre as diversas frações de P, considerando que elas podem identificar frações de P estáveis que podem delimitar o tamanho do reservatório de fósforo lábil no solo (CREWS, 1996). No presente estudo houve correlação entre a fração lábil (Pres+Pi-bic+Po-bic) e a fração P-ác e foi altamente significativa tanto nos Latossolos como nos Luvisolos (0,45 e 0,68, respectivamente). CREWS (1996) encontrou correlações positivas e altamente significativas entre P-ác e Pres (0,96) e P-ác e Pi-bic (0,90), que ele considerou consistente com a hipótese de que P extraível por ácido constitui uma importante fonte de fósforo para alfafa, planta utilizada no seu experimento. TIESSEN et al. (1984) também encontraram correlações significativas, mas baixas, entre a fração Pres e P-ác (0,20) e também entre Po-bic e P-ác (0,25).

Entretanto, o P-lábil se correlacionou melhor com a fração Pi-hid, nas duas classes de solo e também com a fração Po-hid, nos Latossolos (Quadros 5 e 6). A alta correlação com o fósforo extraível por hidróxido de sódio é consistente com informações da literatura de que o P desta fração é uma importante fonte suprindo P-lábil, em solos ácidos (ARAÚJO et al., 1993; CREWS, 1996; ARAÚJO e SALCEDO, 1997).

#### 4. CONCLUSÕES

1. O P total foi muito similar entre Latossolos e Luvisolos, sendo pouco afetado pela posição na vertente. Entretanto, o P lábil foi significativamente maior nos Luvisolos.

2. Em relação à posição na encosta, as frações não apresentaram diferenças marcantes em nenhuma das duas classes de solo. Com a profundidade, em geral, apresentaram tendência de decréscimo, principalmente as frações mais lábeis.

3. Proporcionalmente, a fração Prdu foi o maior reservatório e o P inorgânico lábil (Pres+Pi-bic) o menor, em todos os horizontes, nas duas classes de solo. A distribuição das demais frações diferiu entre horizontes, sendo o P orgânico (Po-bic+Po-hid) dominante nos horizontes mais superficiais e Pi-hid e P-ác nos subsuperficiais.

4. As quantidades de P-ác e sua proporção em relação ao P total sugerem que, as duas classes de solo estão num grau de intemperismo próximo nessas áreas secas e que ambos ainda possuem um reservatório de P primário relativamente grande.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMS, J.A., WALKER, T.W. Some properties of a chrono-toposequence of soils from granite in New Zealand, 2. Forms and amounts of phosphorus. **Geoderma**, n.13, p.41-51, 1975.
- AGBENIN, J.O., TIESSEN, H. Phosphorus transformations in a toposequência of Lithosols and Cambisols from semi-arid northeastern Brazil. **Geoderma**, n.62, p.345-362, 1994.
- ARAÚJO, M.S.B., SALCEDO, I.H. Formas preferenciais de acumulação de fósforo em solos cultivados com cana-de-açúcar na Região Nordeste. **R. Bras. Ci. Solo**, n.21, p.643-650, 1997.
- ARAÚJO, M.S.B., SALCEDO, I.H., SAMPAIO, E.V.S.B. Efeito de fertilizações fosfatadas anuais em solos cultivados com cana-de-açúcar. I. Intensidade e formas de acumulação. **R. Bras. Ci. Solo**, n.17, p.389-396, 1993a.
- ARAÚJO, M.S.B., SALCEDO, I.H., SAMPAIO, E.V.S.B. Efeito de fertilizações fosfatadas anuais em solos cultivados com cana-de-açúcar. II. Formas disponíveis e efeito residual do P acumulado. **R. Bras. Ci. Solo**, n.17, p.397-403, 1993b.
- BALL-COELHO, B., SALCEDO, I.H., TIESSEN, H., STEWART, J.W.B. Short and long-term phosphorus dynamics in a fertilized ultisol under sugarcane. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, n.57, p.1027-1034, 1993.
- COMPTON, J.E., COLE, D.W. Phosphorus cycling and soil P fractions in Douglas-fir and red alder stands. **Forest Ecol. Manag.**, n.110, p.101-112, 1998.
- CONDRON, L.M., GOH, K.M. Effects of long-term phosphatic fertilizer applications on amounts and forms of phosphorus in soils under irrigated pasture. **N. Z. J. Soil Sci.**, n.40, p.383-395, 1989.
- CONDRON, L.M., GOH, K.M. Nature and availability of residual phosphorus in long-term fertilized pasture soils. **N. Z. J. Agric. Sci.**, n.114, p.1-9, 1990.
- CREWS, T.E. The supply of phosphorus from native, inorganic phosphorus pools in continuously cultivated Mexican agroecosystems. **Agric. Ecosyst. Environ.**, n.57, p.197-208, 1996.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Levantamento exploratório- reconhecimento de solos do Estado de Pernambuco**, vol. I, 1973. 359p.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Levantamento exploratório- reconhecimento de solos do Estado de Pernambuco**, vol. II, 1972. 354p.

- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de Métodos de análises de solo**. 2. ed. revis. atual. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212p.
- FARIA, C.M.B. **Práticas que favorecem a capacidade produtiva do solo na agricultura de sequeiro do semi-árido brasileiro**. Petrolina: EMBRAPA-CPATSA, 1992. 30p. (Circular Técnica 28).
- FLOATES, M.J.S. Distribution of organic matter and phosphorus fractions in a topographic sequence of soils in Southern British Columbia. **Can. J. Soil Sci.**, n.45, p.323-329, 1965.
- FRIESEN, D.K., RAO, I.M., THOMAS, R.J.OBERSON, A., SANZ, J.I. Phosphorus acquisition and cycling in crop and pasture systems in low fertility tropical soils. **Plant and Soil**, n.196, p.289-294, 1997.
- FROSSARD, E., STEWART, J.W.B., ST. ARNAUD, R.J. Distribution and mobility of phosphorus in grassland forest soils of Saskatchewan. **Can. J. Soil Sci.**, n.69, p.401-416, 1989.
- FRY, W.H. The condition of soil phosphoric acid insoluble in hydrochloric acid. **J. Ind. Eng. Chem.**, n.5, p.665-666, 1913.
- HEDLEY, M.J., STEWART, J.W.B., CHAUHAN, B.S. Changes in inorganic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, n.46, p.970-976, 1982.
- HONEYCUTT, C.W. **Climate, topography, and cultivation effects on C, N and P dynamics in central Great Plains soils**. Fort Collins: Colorado State University (Diss. Abst. 86-18180), 1986. (PhD Thesis).
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Agropecuário de Pernambuco**. 1995/1996.
- JACKSON, M.L. **Soil chemical analysis** - Advanced Course. 2. ed., Dept. Soil Sci., Univ. Wisconsin, 1969. 881p.
- KAUFFMAN, J.B., SANFORD JR., R.L., CUMMINGS, D.L., SALCEDO, I.H., SAMPAIO, E.V.S.B. Biomass and nutrient dynamics associated with slash fires in neotropical dry forests. **Ecology**, v.74, n.1, p.140-151, 1993.
- KLEMMEDSON, J.O., WIENHOLD, B.J. Aspect and species influences on nitrogen and phosphorus availability in Arizona Chaparral soils. **Soil Sci. Soc. Am J.**, n.55, p.1735-1740, 1991.
- LAJTHA, K., SCHLESINGER, W.H. The biogeochemistry of phosphorus cycling and phosphorus availability along a desert soil chronosequence. **Ecology**, 69(1):24-39, 1988.
- LINDSAY, W.L. **Chemical equilibria in soils**. New York: John Wiley e Sons. 1979. 449p.

- MEHRA, O.P., JACKSON, M.L. **Iron oxide removal from soils and clays by dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate.** In: 7<sup>th</sup> Natl. Conf. on Clays and Clays Minerals, Washington, DC. P317-327. 1960.
- MURPHY, J., RILEY, J.P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Anal. Chem. Acta**, n.27, p.31-36. 1962.
- O'HALLORAN, I.P., STEWART, J.W.B., KACHANOSKI, R.G. Influence of texture and management practices on the forms and distribution of soil phosphorus. **Can. J. Soil Sci.**, n.67, p.147-163, 1987.
- RICHARDS, L.A. **Diagnosis and improvement of saline alkali soil.** Salinity Lab. Handbook 60, 1954. 160p.
- ROBERTS, T.L., STWEART, J.W.B., BETTANY, J.R. The influence of topography on the distribution of organic and inorganic soil phosphorus across a narrow environmental gradient. **Can. J. Soil Sci.**, n.65, p.651-665, 1985.
- SAMPAIO, E.V.S.B., SALCEDO, I.H., SILVA, F.B.R. **Fertilidade de solos do semi-árido do Nordeste.** In: PERREIRA, J.R., FARIA, C.M.B. (Eds). Fertilizantes - insumos básicos para a agricultura e combate à fome. Petrolina: EMBRAPA-CPATSA/SBCS, pp. 51-71, 1995.
- SCHOENAU, J.J., BETTANY, J.R. Organic matter leaching as a component of C, N, P, S cycles in a forest, grassland and gleyed soil. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, n.51, p.646-651, 1987.
- SCHWERTMANN, U. Differenzierung der Eisenoxide des Bodens durch Extraktion mit Ammoniumoxalat-Lösung. **Z. Pflanzenernaehr Bodenkd.**, n.105, p.194-192, 1964.
- SELLES, F., KOCHHANN, R.A., DENARDIN, J.E., ZENTNER, R.P., FAGANELLO, A. Distribution of phosphorus fractions in a Brazilian Oxisol under different tillage systems. **Soil Till. Res.**, n.44, p.23-34, 1997.
- SHARPLEY, A.N., JONES, C.A., GRAY, COLE, C.V., TIESSEN, H., HOLZHEY, C.S. **A detailed phosphorus characterization of seventy-eight soils.** USDA Agricultural Research Services, ARS-31, 1985.
- SMECK, N.E. Phosphorus an indicator of pedogenetic weathering processes. **Soil Sci.**, n.115, p.199-206, 1973.
- SMECK, N.E. Phosphorus dynamics in soils and landscapes. **Geoderma**, n.36, p.185-189, 1985.

- SNYDER, J.D., TROFYMOW, J.A. A rapid accurate wet oxidation diffusion procedure for determining organic and inorganic carbon in plant and soil sample. **Comm. Soil Sci. Pl. Anal.**, n.15, p.587-597, 1984.
- SUDENE. Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste. **Relatório de fim de convênio de manejo e conservação de solos no nordeste brasileiro** (1982/83). Leprun, S.C. 1983.
- SYERS, J.K., WILLIAMS, J.D.H., WALKER, T.W. The determination of total phosphorus in soils and parent materials, **N. Z. J. Agric. Res.**, n.11, p.757-62, 1968.
- SYERS, J.K., WILLIAMS, J.D.H., CAMPBELL, A.S., WALKER, T.W. The significance of apatite inclusions in soil phosphorus studies. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, n.31, p.752-756, 1967.
- TAYLOR, A.W., GURNEY, E.L. Precipitation of phosphate by iron oxide and aluminium hydroxide from solutions containing calcium and potassium. **Soil Sci. Soc. Proc.**, n.29, p.18-22, 1965.
- TAYLOR, A.W., LINDSAY, W.L., HUFFMAN, E.O., GURNEY, E.L. Potassium and ammonium taranakites, amorphous aluminium phosphate and variscite as source of phosphorus for plants. **Soil Sci. Soc. Amer. Proc.**, n.27, p.148-151, 1963.
- TIESSEN, H., SALCEDO, I.H., SAMPAIO, E.V.S.B. Nutrient and soil organic matter dynamics under shifting cultivation in semi-arid northeastern Brazil. **Agric. Ecosyst. Environ.**, n.38, p.139-151, 1992.
- TIESSEN, H., STEWART, J.W.B., COLE, C.V. Pathways of phosphorus transformation in soils of differing pedogenesis. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, n.48, p.853-858, 1984.
- UDO, E.J., OGUNWALE, J.A. Phosphorus fractions in selected Nigerian soils. **Soil Sci. Am. J.**, n.41, p.1141-1146, 1977.
- WALKER, T.W., ADAMS, A.F.R. Studies on soil organic matter: I. Influence of phosphorus content of parent materials on accumulations of carbon, nitrogen, sulfur and organic phosphorus in grassland soils. **Soil Sci.**, n.85, p.307-318, 1958.
- WALKER, T.W., SYERS, J.K. The fate of phosphorus during pedogenesis. **Geoderma**, n.15, p.1-19, 1976.
- WILD, A. **Russell's Soil Conditions and Plant Growth**. 11.Ed. Harlow: Longman Group UK Ltd, 1988. 326p.

## **CAPÍTULO 2**

### **FÓSFORO EM TOPOSSEQÜÊNCIAS DE LATOSSOLOS E LUVISSOLOS DO SEMI-ÁRIDO DE PERNAMBUCO. 2. BIODISPONIBILIDADE DAS FRAÇÕES**

#### **RESUMO**

Para avaliar a disponibilidade de P no solo, amostras dos terços superior, médio e inferior de toposseqüências de Latossolos e Luvisolos foram coletadas no semi-árido de Pernambuco. Amostras dos horizontes superficiais e imediatamente subsuperficiais foram submetidas a um cultivo em vasos, durante quatro meses. O P foi medido antes e depois do cultivo por uma extração seqüencial, nas seguintes frações: P extraído por resina (Pres); bicarbonato de sódio, inorgânico e orgânico (Pi-bic e Po-bic); hidróxido de sódio, inorgânico e orgânico (Pi-hid e Po-hid); ácido sulfúrico (P-ác) e; digestão peróxido/sulfúrica, P residual (Prdu). O P absorvido pelas plantas foi medido por digestão peróxido/sulfúrica. Para avaliar quais frações estariam contribuindo para a reposição de P-res, as mesmas amostras de solo utilizadas no cultivo foram submetidas a dez extrações sucessivas com resina e depois incubadas, com umidade equivalente a 80% da capacidade de campo, durante quatro meses. Após esse período, as amostras foram submetidas a uma extração seqüencial de P. Os efeitos do cultivo e da incubação foram avaliados pelas diferenças entre frações de P determinadas antes e após o cultivo, e antes e após a incubação. O P absorvido pelas plantas não diferiu entre posições na encosta e, entre profundidades foi maior nos horizontes superficiais, sendo consistente com a produção de matéria seca, nas duas classes de solo. Os decréscimos nas frações de P apresentaram tendências de serem maiores nos horizontes superficiais. Os decréscimos em P lábil (P-res+Pi-bic+Po-bic) corresponderam ao P absorvido pelas plantas. Em termos relativos Pres e o Pi-bic foram as frações mais depletadas, nas duas classes de solo. Após incubação, P-res recuperou entre 20-30% do seu valor inicial, nos horizontes A e entre 50-90% nos subsuperficiais, nas duas classes de solo. As frações que decresceram após incubação foram Pi-hid, Po-hid, P-ác e P-rdu, nos

Latossolos e Pi-bic, Po-hid e P-rdu, nos Luvisolos, em detrimento dos acréscimos nas outras. O P absorvido pelas plantas foi altamente correlacionado com os decréscimos em P-res e Pi-bic, em ambos os solos, e nos Luvisolos foi ainda com Pi-hid e P-ác.

## SUMMARY

### PHOSPHORUS IN OXISOLS AND LUVISOLS TOPOSEQUENCES FROM SEMI-ARID PERNAMBUCO, NE-BRAZIL. II. BIOAVAILABILITY OF P FRACTIONS

The P availability was evaluated in Oxisols and Luvisols toposequences, at upslope, midslope and downslope positions at the semi-arid Pernambuco, following four month pot cultivation. Phosphorus was measured before and after cultivation by a sequential extraction in the following fractions: P-resin, P-sodium bicarbonate, inorganic and organic (Pi-bic and Po-bic), P-sodium hydroxide, inorganic and organic (Pi-hid and Po-hid), P sulphuric acid (P-ac) and residual P (P-rdu) by a sulphuric acid/peroxide digestion. The P in the plants was determined after sulphuric acid /peroxide digestion. In order to evaluate the contribution of each fraction to the replenishment of P-resin, the same samples were submitted to ten successive extractions with resin strip, incubated for four months and the P measured by a sequential extraction. The plant absorbed P did not differ along the different slope positions, being greater in the surface samples, agreeing with dry-matter production in both soils. The P fraction decreases were higher at the surface. The labile P pool (P-resin+Pi-bic+Po-bic) showed corresponding decrease to increasing P absorption by plants. Proportionally, the P-resin and Pi-bic were the main labile fractions supplying plants. Following incubation, P-resin recovered 20-30% of the initial value in A horizon, and between 50-90% in subsurface horizon, in both soils. There was highly significative and positive correlation between the decrease in the inorganic fractions and carbon and potassium, in both experiments. Among fractions, P-resin was highly correlated with Pi-bic, Pi-hid and P-ac in the Oxisols and Pi-bic, Po-bic and Pi-hid in the Luvisols.

## 1. INTRODUÇÃO

Com o aumento populacional e, conseqüentemente, uma maior demanda por alimentos, há uma crescente pressão de cultivo em áreas não tradicionalmente utilizadas para produção. Nesse contexto, os trópicos semi-áridos têm sido objeto de estudos, sendo vistos como locais onde a agricultura pode ser expandida (ICRISAT, 1991). Eles ocupam aproximadamente 20 milhões de km<sup>2</sup> (SWINDALE, 1982; KANWAR, 1986), onde importantes culturas para consumo humano vêm sendo plantadas, principalmente leguminosas (EL-SWAIF e CALDWELL, 1991). No nordeste brasileiro, em particular, a agricultura no semi-árido é ainda pouco desenvolvida. Em geral, é praticada sem adubação e as terras são abandonadas logo após os primeiros anos de cultivo, devido ao grande decaimento da produção já a partir do segundo ano (TIESSEN et al., 1992). Práticas de manejo de fertilizantes para reposição dos nutrientes removidos pelas culturas são essenciais para a manutenção de um sistema de cultivo eficiente. Para isso, entretanto, seria necessário um conhecimento mais preciso da fertilidade do solo. Um dos nutrientes mais limitantes para aumentar a produção nessas áreas é o fósforo, já que grande parte dos solos apresenta baixa disponibilidade deste nutriente (SAMPAIO et al., 1995) e resposta positiva a sua aplicação (FARIA, 1992). Entretanto, estudos mais detalhados sobre a disponibilidade de fósforo em solos do semi-árido nordestino são quase inexistentes.

O suprimento de fósforo disponível dos solos depende das quantidades e formas presentes no solo (KAMPRATH, 1991). Estas podem ser medidas utilizando-se um fracionamento seqüencial de P no solo (HEDLEY et al., 1982a; WAGAR et al., 1986; CONDRON e GOH, 1989), que determina formas orgânicas e inorgânicas de P no solo. Os processos geoquímicos são um dos que controlam a disponibilidade de fósforo para as plantas (LAJTHA e SCHLESINGER, 1988; BECK e ELSENBEER, 1999). Como resultado do intemperismo, o fósforo de minerais primários é liberado na solução do solo de onde pode ser absorvido por plantas ou microrganismos, adsorvido, lixiviado, ou transformado em compostos Ca, Fe e Al (WALKER e SYERS, 1976). O fósforo na solução do solo é então controlado pela concentração do Ca, Fe e Al no solo (LINDSAY e MORENO, 1960). Como os solos de clima seco apresentam-se, em geral, menos intemperizados que os de clima úmido, mesmo aqueles mais desenvolvidos como os Latossolos, é provável que existam diferenças nas quantidades de formas disponíveis de fósforo entre solos da área úmida e do semi-árido. No capítulo anterior, a quantidade de P extraída por ácido nos Latossolos foi maior que a normalmente encontrada em solos de regiões úmidas. Essa forma de P, relativamente estável (WAGAR et al., 1986; SCHOENAU et al., 1989) poderá, com o tempo, promover a manutenção de fósforo lábil no sistema (WALKER e SYERS, 1976; CREWS, 1996). Entretanto, a manutenção do P lábil está ligada à disponibilidade das outras frações de P no solo.

As diferenças de umidade devem gerar diferenças nessa disponibilidade, já que umidade é um fator fundamental nas transformações de fósforo (BARROW, 1974; OLSEN e COURT, 1982; BRAMLEY e BARROW, 1992). Como o relevo moderadamente ondulado é comum no semi-árido nordestino, toposseqüências de solo são um cenário ideal para se estudar a dinâmica de P no solo, porque as diferentes posições na encosta possibilitam medir a disponibilidade de P em diferentes níveis de umidade.

Os objetivos deste trabalho foram: 1. determinar a disponibilidade do fósforo nativo do solo, em perfis dos terços superior, médio e inferior de toposseqüências de Latossolos e Luvisolos, utilizando-se um cultivo em

casa de vegetação, comparando-se entre profundidades, posições na encosta e áreas mais (Latosolos) e menos intemperizadas (Luvissolos), no semi-árido de Pernambuco; e 2. determinar quais frações de P participam do processo de reposição do P extraído por resina, considerado o P mais lábil, após submeter amostras de solo a dez extrações sucessivas com resina e incubar durante quatro meses. Para os dois objetivos, as frações de P foram determinadas antes e depois do experimento, por uma extração seqüencial.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

As amostras de solos foram coletadas nos Municípios de Santa Rita e Parnamirim, localizados no semi-árido de Pernambuco e são as mesmas que foram estudadas no capítulo anterior, onde estão descritas suas características químicas e físicas. Foram utilizados os horizontes A, BA e Bw1 e A e Bt dos terços superior, médio e inferior, das três toposeqüências de Latossolos e das três de Luvisolos, respectivamente.

### 2.1. Experimentos

Foram conduzidos dois experimentos. O primeiro em casa de vegetação, para medir o fósforo disponível - subamostras de 100 g de solo dos horizontes A, BA e Bw1 e A e Bt foram submetidas a um cultivo em vasos de PVC, com desenho experimental completamente ao acaso, com três repetições. Foram semeadas 15 sementes de capim braquiária (*Brachiaria decumbens* Stapf) e os solos receberam uma solução nutritiva (EPSTEIN, 1972) contendo todos os nutrientes menos fósforo. Devido a um baixo percentual de germinação, para garantir as quinze plantas por vaso foi necessário colocar as sementes para germinar a parte. Foram transplantadas 25 sementes germinadas para cada vaso e, após a aparição das primeiras folhas, foi feito um desbaste para 15 plantas. A germinação foi feita em pedaços de algodão, adicionando-se apenas água desmineralizada.

O experimento foi mantido durante quatro meses, completando-se o nível de umidade do solo (100% da capacidade de retenção de água) duas vezes ao dia. Após esse período, foram colhidas a parte aérea e as raízes, que foram secas em estufa a 60°C, pesadas e moídas. O solo foi seco ao ar e retiradas as raízes mais finas que ainda tinham permanecido após a colheita da planta. Foi analisado fósforo no solo e na planta. Na planta, foi determinado o fósforo total, por digestão peróxido-sulfúrica (THOMAS et al., 1967). O fósforo do solo foi determinado pelo fracionamento seqüencial, proposto por HEDLEY et al. (1982a), modificado, seguindo o mesmo esquema apresentado na Figura 1 do capítulo anterior: subamostras de solo, passadas em peneira de 0,149 mm, foram agitadas seqüencialmente com resina (ANION 204UZRA - no tamanho de 7 x 1 cm, totalizando uma área de 14 cm<sup>2</sup>) e água, com bicarbonato de sódio, com hidróxido de sódio, com ácido sulfúrico e, por último, os resíduos de solo remanescentes foram digeridos com ácido sulfúrico e várias adições de 0,5 ml de peróxido de hidrogênio, até o solo se tornar esbranquiçado. Numa alíquota de cada extrato fósforo foi determinado colorimetricamente. Em outra alíquota dos extratos do bicarbonato de sódio e do hidróxido de sódio, além de P inorgânico, também foi medido o P total (Pt), noutra alíquota, após digestão com H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentrado e K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>, em autoclave por 1 h a 127 °C. O fósforo orgânico foi determinado por diferença entre o P total e o P inorgânico de cada extrato. Todas as determinações de fósforo foram feitas pelo método colorimétrico de MURPHY e RILEY (1962). O fósforo total foi calculado como a soma de todas as frações determinadas.

O segundo experimento foi feito em laboratório, para avaliar quais frações estariam participando da reposição do P mais lábil. Subamostras de solo dos mesmos horizontes utilizados para o experimento em casa de vegetação e passadas em peneira de 0,149 mm, tiveram seus reservatórios de P resina praticamente esgotados (leitura de fósforo a partir da oitava extração foi praticamente a mesma leitura da água desmineralizada), após serem submetidas a 10 extrações sucessivas com tiras de resina (ANION 204UZRA), na proporção de 2 g solo/120 ml água (mesma proporção utilizada no fracionamento) e 4 tiras de resina. Depois, o P retido nas resinas foi extraído com 120 ml de HCl 0,5 mol L<sup>-1</sup> e, numa alíquota desse extrato

determinado P por colorimetria. Os solos foram secos ao ar, depois umedecidos a 80% da sua capacidade de retenção de água e incubados durante quatro meses, em sacos plásticos vedados. A cada 15 dias a umidade era restabelecida ao nível inicial. Após a incubação, as amostras foram secas ao ar e nelas determinado fósforo por extração seqüencial.

Os efeitos do cultivo e da incubação foram calculados pela diferença entre as concentrações nas frações de fósforo determinadas antes, cujos resultados estão apresentados no capítulo anterior, e depois dos experimentos em casa de vegetação e de incubação.

## **2.2. Análises estatísticas**

Para comparações dos efeitos médios do cultivo e da incubação, nas frações de P do solo, entre profundidades e entre posições na encosta, em cada área, e entre áreas, os dados foram submetidos a uma análise de variância utilizando o ANOVA e o teste de DMS, ao nível de 5%. Para encontrar interrelações entre frações de fósforo e propriedades selecionadas do solo, foi obtida uma matriz de correlação (PEARSON). O programa estatístico utilizado foi o STATISTICA (STARTSOFT, INC., 1995).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Experimento em casa de vegetação

O P absorvido pelas plantas foi significativamente maior nos horizontes superficiais, em todas as posições na encosta, e similar entre os horizontes subsuperficiais, nos Latossolos e nos Luvisolos (Quadro 1). Entre as posições na encosta, não houve diferenças marcantes em nenhuma das classes de solo. Nos Luvisolos ele foi significativamente maior que nos Latossolos, com médias de 18,8 e 9,0 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente, nos horizontes superficiais. A produção de matéria seca foi consistente com esses resultados e teve médias de 55 e 32 mg kg<sup>-1</sup> nesses horizontes, respectivamente (Quadro 1).

Tanto nos Latossolos como nos Luvisolos, os decréscimos em P lábil (Pres+Pibic+Pobic) após cultivo, corresponderam, de um modo geral, à concentração de P absorvido pelas plantas (Quadro 1). Este resultado corrobora a designação dada a essas frações como as mais disponíveis às plantas (HEDLEY et al., 1982a; WAGER et al., 1986; TIESSEN et al., 1984). As frações P-res e Pi-bic foram as que praticamente supriram a planta, sendo depletadas, na maioria dos casos, em mais de 50% em relação ao seu valor inicial, nas duas áreas (Quadro 2). O Po-bic, que contribuiu em menor proporção, apresentou acréscimos e decréscimos após o cultivo, nos Latossolos e Luvisolos. Onde existia um Pres+Pi-bic relativamente baixo,

Quadro 1 - Diferenças entre as frações de fósforo determinadas antes e após o cultivo em casa de vegetação. Valores negativos significam decréscimos e positivos, acréscimos

Horiz	P-res	Pi-bic	Po-bic	Pi-hid	Po-hid	P-ác	Prdu	Ptotal	P-pl	M.S.
----- mg . kg <sup>-1</sup> ----- g.kg <sup>-1</sup>										
<b>Latossolos</b>										
<b>Terço superior</b>										
A	-6,0a	-3,7a	+0,9	-4,7aA	-5,0	-13,3	-3,0	-34,8	8,1a	32a
BA	-1,0b	-2,6abA	+0,8	-2,5abBA	-8,6	-6,5	-4,3	-24,7	2,1b	10b
Bw1	-0,6b	-1,1bB	-1,2	-0,8b	-8,1	-5,6	-4,6	-21,9	2,3b	10b
<b>Terço médio</b>										
A	-6,1	-4,6a	+1,0ab	-5,9AB	-4,1b	-9,0	-1,5	-30,3	9,1a	33a
BA	-1,1	-0,9bB	-0,9a	-1,8B	-10,0a	-7,1	-2,5	-24,2	2,5b	12b
Bw1	-0,9	-3,3abA	+1,5b	-2,5	-7,9a	-8,0	-2,3	-23,3	2,4b	14b
<b>Terço inferior</b>										
A	-6,1	-4,8	+1,9	-10,2B	-7,8	-11,2	-1,6	-39,7	9,7a	32a
BA	-1,4	-2,0A	+0,3	-6,7A	-12,7	-8,2	-0,6	-31,2	3,0b	14b
Bw1	-1,0	-2,0AB	+0,3	-4,7	-8,2	-5,5	-2,5	-23,5	2,7b	12b
<b>Luvissolos</b>										
<b>Terço superior</b>										
A	-11,1a	-4,6	-2,4	-11,5	-9,4A	-8,4	-3,8	-51,2a	18,1a	47a
Bt	-1,4b	-2,3	-1,5	-4,5	-4,8	+3,0B	-6,5	-18,0b	3,8b	12b
<b>Terço médio</b>										
A	-12,3a	-4,9	-1,3	-11,8	+7,5aB	-7,0	-0,9	-30,7	18,6a	56a
Bt	-0,5b	-3,3	+0,9	-5,8	-3,9b	+0,8BA	-4,4	-16,2	3,1b	13b
<b>Terço inferior</b>										
A	-13,0	-4,7	-2,1	-14,8	-4,5A	-12,7a	-5,1	-56,8	19,8a	61a
Bt	-1,0	-1,6	-2,5	-4,2	-6,3	-0,6bA	-5,4	-21,6	3,2b	14b

Horiz. = horizontes; res = resina; i = inorgânico; o = orgânico; bic = bicarbonato; hid = hidróxido; ác = ácido; rdu = residual; P-pl = P absorvido pelas plantas e; M.S., matéria seca; Ptotal =  $\Sigma$  frações. Valores na coluna, para uma mesma posição na encosta, seguidos de letras minúsculas diferentes e para um mesmo horizonte, seguidos de letras maiúsculas diferentes, diferem significativamente entre si pelo teste de DMS a 5%.

pode ter havido mineralização de Po-bic como uma das formas de suprir esses dois reservatórios, causando decréscimos nesta fração. Onde Pres+Pi-bic era relativamente alto, pode ter havido competição entre plantas e microorganismos, e parte destes dois reservatórios (Pres+Pi-bic) imobilizado por estes últimos, ocorrendo um acréscimo na fração Po-bic.

As frações inorgânicas extraídas pelo hidróxido e pelo ácido também sofreram reduções após o cultivo (Quadro 1). Outros autores também têm encontrado decréscimos nessas frações, que tradicionalmente são consideradas de baixa disponibilidade às plantas (HEDLEY et al., 1982b; ARMSTRONG e HELYAR, 1992; CREWS 1996). No experimento de ARMSTRONG e HELYAR (1992) eles concluíram que estas frações foram depletadas devido à capacidade das gramíneas utilizadas em seu estudo extraírem fósforo destas frações pouco lábeis.

Quadro 2 - Proporção média dos decréscimos e acréscimos, em relação ao seu valor inicial, nas frações de P no solo, após quatro meses de cultivo em casa de vegetação. Valores negativos significam decréscimos e positivos, acréscimos

Horiz	P-res	Pi-bic	Po-bic	Pi-hid	Po-hid	P-ác	Prdu	Ptotal
-----%-----								
<b>Latossolos</b>								
<b>Terço superior</b>								
A	-75	-51	+14	-10	-9	-33	-1	-9
BA	-57	-72	+20	-8	-20	-22	-2	-8
Bw1	-43	-45	-27	-3	-34	-23	-2	-7
<b>Terço médio</b>								
A	-60	-60	+18	-16	-7	-28	-1	-12
BA	-69	-43	-16	-10	-19	-41	-2	-12
Bw1	-57	-76	+44	-10	-21	-34	-2	-10
<b>Terço inferior</b>								
A	-88	-61	+32	-23	-10	-35	-1	-13
BA	-72	-53	+5	-21	-18	-30	0	-11
Bw1	-62	-44	+8	-14	-22	-21	-2	-9
<b>Luvissolos</b>								
<b>Terço superior</b>								
A	-78	-43	-26	-30	-14	-14	-3	-15
Bt	-64	-59	-21	-32	-15	+12	-5	-8
<b>Terço médio</b>								
A	-74	-45	-12	-33	+12	-10	-1	-9
Bt	-42	-67	+17	-35	-10	+4	-3	-7
<b>Terço inferior</b>								
A	-89	-47	-16	-39	-5	-16	-3	-15
Bt	-55	-45	-32	-26	-13	-1	-4	-8

Horiz.= horizontes; res = resina; i = inorgânico; o = orgânico; bic = bicarbonato; hid = hidróxido; ác = ácido; rdu = residual.

É comum haver aumentos nas frações orgânicas após cultivo (HEDLEY et al., 1982b; ARMSTRONG e HELYAR, 1992), devido às transformações sofridas durante o período de cultivo, principalmente nas condições de cultivo em casa de vegetação, com pouco solo e muitas raízes, intensificando os processos de transformação de fósforo inorgânico para orgânico. Foi o que ocorreu na maioria dos casos em Po-bic nos Latossolos. Entretanto, Po-bic nos Luvissolos e Po-hid nas duas classes de solo decresceram na maioria dos casos (Quadro 1), aumentando ainda mais as diferenças de P entre antes e após cultivo.

BROOKES e POWLSON (1981) mediram perdas de P durante a digestão com HClO<sub>4</sub> (ácido perclórico) em extratos de NaHCO<sub>3</sub> (bicarbonato de sódio), onde concluíram que pode ter havido transformações de P para formas diferentes de ortofosfato e que não são medidas pelo método colorimétrico. Com o maior tempo de digestão, as perdas aumentaram. Eles

ainda verificaram que estas perdas poderiam ser minimizadas com a adição de cloreto de magnésio aos extratos, antes da digestão. Portanto, é possível que a diferença total de P entre antes e após cultivo maior do que o que a planta retirou seja atribuível a um problema metodológico. Como neste trabalho a digestão nos extratos de bicarbonato e de hidróxido de sódio foi feita sem adição do cloreto de magnésio, essa suposição fica ainda mais reforçada.

Ainda, considerando que as perdas realmente ocorreram por problemas na digestão, o erro deveria ser relativamente uniforme nas determinações antes e depois do cultivo já que foi utilizado o mesmo método, e então, as diferenças refletiriam apenas o efeito do cultivo. Entretanto, como as diferenças foram além do que o que foi absorvido pelas plantas, é provável que, nas amostras de solo após cultivo, que receberam exsudados das plantas, o P tenha sido mais vulnerável a transformações para formas não detectáveis pelo método colorimétrico, apresentando resultados de P aquém do que deveria. Neste caso, o  $P_o$ , que é estimado de forma indireta pela diferença entre  $P_t$  e  $P_i$ , poderia estar sendo subestimado, justificando os decréscimos ocorridos após cultivo.

Em valores absolutos,  $P_i$ -hid foi a fração mais depletada, similarmente ao que ocorreu em áreas cultivadas e fertilizadas (ARAÚJO et al., 1993; ARAÚJO e SALCEDO, 1997). Essa fração, embora represente formas de baixa disponibilidade, associada a compostos de Fe e Al (WILLIAMS et al., 1980; ROBERTS e STEWART, 1987), pode existir em estado mais ou menos lábil, dependendo do tempo de formação do fosfato e das condições do solo (RAIJ, 1991). Nos Luvisolos, esta fração  $P_i$ -hid foi reduzida em média 34% nos horizontes A e, nos Latossolos essa média foi um pouco menor, 16% (Quadro 2). O maior grau de evolução dos óxidos de Fe nos Latossolos, em relação aos Luvisolos, deve aumentar a resistência da associação (Fe, Al)-P.

O P ligado a cálcio (P-ác), embora seja uma fração considerada relativamente estável (HEDLEY et al., 1982a; WAGAR et al., 1986), nos Latossolos apresentou uma redução entre 20 e 40% do seu valor inicial, percentual maior até do que o da fração  $P_i$ -hid, na maioria dos casos (Quadro 2), devendo ter sofrido influência do abaixamento do pH com o

cultivo, liberando P-Ca. Em áreas úmidas, a fração Pi-hid normalmente tem uma depleção maior que P-ác após cultivo (GOH e CONDRON, 1989; CONDRON e GOH, 1990; ARMSTRONG e HELYAR, 1992; ARAÚJO et al., 1993). Esses resultados são consistentes com os dados do capítulo anterior, em que se encontra uma alta e significativa correlação entre P lábil e P-ácido, corroborando a premissa que este pode estar sendo uma fonte de manutenção, a longo prazo, do P lábil neste solos de clima seco. Nos Luvisolos, a fração P-ác também sofreu redução após o cultivo, embora em um percentual menor que nos Latossolos (Quadro 2) e em alguns casos chegou até a aumentar.

Os percentuais de depleção do Po-hid, após cultivo, variaram entre 9 e 34% nos Latossolos e 5 e 15% nos Luvisolos. HEDLEY et al. (1982a) também verificaram decréscimos nesta fração, em áreas cultivadas com trigo, sem adição de fertilizantes. Os decréscimos proporcionais, em geral, tenderam a aumentar com a profundidade, possivelmente porque os horizontes mais profundos tiveram menores concentrações de P lábil, forçando a maior mineralização das frações orgânicas (BECK e SANCHEZ, 1994) para atender as necessidades das plantas. O solo nas condições de cultivo do trabalho ficou muito próximo a um solo de rizosfera, tornando-se assim mais sujeito aos efeitos da excreção de ácidos orgânicos (MOGHINI et al., 1978) e à hidrólise de fosfatos orgânicos pelas fosfatases (HELAL e SAUERBECK, 1984), além de ter uma intensa atividade microbiana, que solubiliza fósforo orgânico e mineral (BANIK e DEY, 1981).

A fração P-rdu é considerada uma fração não disponível às plantas e que praticamente não sofre alterações após cultivos, pelo menos os de curta duração (WAGAR et al., 1986; SCHOENAU et al., 1989). Nela estão incluídas formas inorgânicas ocluídas e orgânicas mais resistentes. Consistente com essa conceituação, a fração Prdu praticamente não se alterou após o cultivo. O percentual de depleção correspondente a esta fração foi muito baixo (Quadro 2), cerca de 1 a 2% do seu valor inicial, nos Latossolos e 3 e 4%, nos Luvisolos e, provavelmente, corresponde ao erro analítico, já que esta é a última fração a ser determinada na extração seqüencial. Além disso, pode ter ocorrido uma perda pelo processo de digestão já discutido anteriormente. Utilizando o mesmo tipo de digestão

feita neste trabalho para determinar P-rdu, a peróxido/sulfúrica, GOH e CONDRON (1989) e CONDRON e GOH (1989) têm adicionado o cloreto de magnésio para evitar perdas de fósforo.

Praticamente não houve diferenças significativas nos decréscimos médios totais das concentrações de fósforo, nos Latossolos e Luvisolos, entre posições na encosta ou entre profundidades, na maioria das frações (Quadro 1). Contudo, esses decréscimos apresentaram tendência geral de serem maiores nos horizontes superficiais, provavelmente pelo maior crescimento das plantas neste horizontes. Entre as classes de solos, os decréscimos médios totais também não apresentaram diferenças marcantes, com médias de 35 e 46 mg kg<sup>-1</sup>, nos horizontes A, para Latossolos e Luvisolos. Embora similares nos decréscimos totais, diferiram significativamente nos decréscimos médios no P lábil, 9,1 e 18,8 mg kg<sup>-1</sup>, para Latossolos e Luvisolos.

### **3.2. Experimento com incubação**

Similarmente ao que ocorreu no experimento com plantas, o efeito total não ficou completamente balanceado com o retirado pelas dez extrações sucessivas com resina (Quadro 3). Como é improvável que tenham ocorrido perdas de P durante a incubação, perdas durante as digestões também podem ser inferidas para este caso. Entre as duas classes de solo, à semelhança do experimento com plantas em horizontes A, os decréscimos médios em P total não diferiram significativamente, 30 e 45 mg kg<sup>-1</sup>, e os em P lábil apresentaram diferenças marcantes, 3,5 e 12,6 mg kg<sup>-1</sup>, para Latossolos e Luvisolos, respectivamente.

O fósforo retirado pelas dez extrações seqüenciais com resina (Quadro 4) foi muito maior que o fósforo absorvido pelas plantas (Quadro 1). Assim, seria esperado que os decréscimos das concentrações nas frações de P no experimento com incubação fossem maiores, principalmente na fração P-res, que foi esgotada. Entretanto, os decréscimos em P resina e P total, após incubação foram relativamente similares, nas duas classes de solo (Quadros 1 e 3). Nas outras frações os decréscimos foram maiores ou após incubação ou após cultivo, embora o P inorgânico (P-res+Pi-bic+Pi-hid+P-ác)

Quadro 3 - Efeito médio da incubação nas toposequências de solo. Valores negativos significam decréscimos e positivos, acréscimos

Horiz	P-res	Pi-bic	Po-bic	Pi-hid	Po-hid	P-ác	Prdu	Ptotal	Psuc
-----mg . kg <sup>-1</sup> -----									
<b>Latossolos</b>									
<b>Terço superior</b>									
<b>A</b>	-6,4a	+1,1	+1,2	-3,0	-10,9	-5,4	-4,0	-27,4	13,14
<b>BA</b>	-0,7b	+0,1	+1,1	+0,2B	-12,9	-0,1	-6,2	-18,5	6,02
<b>Bw1</b>	-0,3b	+1,6B	-1,3	-0,9	-9,6	+1,6	-4,5	-13,3	7,03
<b>Terço médio</b>									
<b>A</b>	-8,6	-1,2	+4,0a	-5,6a	-10,0	-7,7a	-2,1	-31,1	20,52
<b>BA</b>	-0,6	+1,0	-0,6b	+0,6bB	-13,0	-0,5b	-4,5	-17,9	5,85
<b>Bw1</b>	-0,4	-0,8A	+0,8b	-0,4b	-11,7	-1,2b	-6,8	-20,4	6,95
<b>Terço inferior</b>									
<b>A</b>	-4,8a	-0,2	+4,4a	-7,9	-10,9	-5,8	-6,5	-31,7	11,80
<b>BA</b>	-0,9ab	+1,0	+0,8b	-4,6A	-16,8	-5,1	-5,0	-30,5	7,34
<b>Bw1</b>	-0,4b	+0,9BA	-0,2b	-3,5	-11,3	-4,0	-4,1	-22,6	7,08
<b>Luvisolos</b>									
<b>Terço superior</b>									
<b>A</b>	-11,6	-2,4	+1,2	+3,8	-13,1	-13,9	-2,3	-45,8a	30,21
<b>Bt</b>	-1,0	-1,4	-0,8	+1,9	-11,6	+7,7	-3,7	-9,0b	9,13
<b>Terço médio</b>									
<b>A</b>	-13,5a	-2,9	+1,4	+4,4	-15,3	-15,4	-3,6	-40,2	44,52
<b>Bt</b>	-0,1b	-2,0	+0,2	+3,2	-15,1	+5,8	-2,5	-11,4	11,20
<b>Terço inferior</b>									
<b>A</b>	-10,5	-1,6	+1,9	+4,9	-18,0	-20,1a	-5,6	-49,1	43,90
<b>Bt</b>	-0,5	-0,6	+0,9	+2,7	-13,8	+5,8b	-4,2	-4,4	13,22

Horiz.= horizontes; res = resina; i = inorgânico; o = orgânico; bic = bicarbonato; hid = hidróxido; ác = ácido; rdu = residual; Psuc = P obtido dez extrações sucessivas com resina. Valores na coluna, para uma mesma posição na encosta, seguidos de letras minúsculas diferentes e para um mesmo horizonte, seguidos de letras maiúsculas diferentes, diferem significativamente entre si pelo teste de DMS a 5%.

tenha decrescido mais com o cultivo e o P orgânico (Po-bic+Po-hid) mais com a incubação. Isto, provavelmente, se deve a distintas dinâmicas de reposição do P lábil. No experimento com incubação, a retirada de P do solo foi especificamente de uma fração inorgânica, a P-res, já que só foram utilizadas as tiras de resina para esgotar o P lábil. Além disso, a incubação pode ter induzido uma atividade microbiana mais intensa do que no experimento com plantas, mineralizando mais fósforo orgânico para preencher o reservatório inorgânico mais lábil, Pres (ADEPTU e COREY, 1977; O'HALLORAN et al., 1987). Já com o cultivo, o P absorvido é retirado de P-res e de outras frações inorgânicas que tenham algum grau de labilidade (TIESSEN et al., 1984; WAGAR et al., 1986; SCHOENAU et al., 1989), além, obviamente, das frações orgânicas lábeis. Contudo, como após cultivo os maiores decréscimos ocorreram nas frações inorgânicas (Quadro 1), esta provavelmente tenha sido a forma mais utilizada pelas plantas.

Após a incubação, nos horizontes A, os decréscimos em P inorgânico foram maiores que em P orgânico, mas nos horizontes subsuperficiais ocorreu o inverso, nas duas classes de solo (Quadro 3). Esses decréscimos maiores em Po que em Pi nos horizontes mais profundos, como já discutido anteriormente, se devem, provavelmente, ao fato desses horizontes mais profundos possuírem um P lábil muito pequeno, proporcionando condições favoráveis para uma maior mineralização do Po. Existindo P inorgânico lábil em quantidade suficiente para suprir a planta, o processo de mineralização pode se tornar mais lento. Consistente com isso, onde existia pouco P inorgânico lábil, como no caso da maioria dos horizontes mais profundos das duas classes de solo, a depleção do P orgânico foi maior, tanto após o cultivo como após a incubação (Quadros 1 e 3).

Após quatro meses de incubação, a recuperação proporcional de P-res foi apenas cerca de 20-30% do seu valor inicial nos horizontes A e foi semelhante nas duas classes de solos. Nos horizontes subsuperficiais a recuperação foi muito mais alta, entre 50-90% (Quadro 4). Como os horizontes mais profundos tinham muito pouco P resina, foi mais fácil de atingir seu valor inicial, após este período de incubação.

Considerando que P-res antes da incubação foi esgotada até praticamente zero, os valores extraídos após a incubação são acréscimos neste reservatório. Estes valores foram em média  $1,8 \text{ mg kg}^{-1}$  no horizonte A e  $1,1 \text{ mg kg}^{-1}$  no BA e Bw1, e  $3,3$  e  $1,2 \text{ mg kg}^{-1}$  no A e Bt. Sendo assim, após a incubação, nos Latossolos houve acréscimos, principalmente, nas frações P-res, Pi-bic e Po-bic, em detrimento de decréscimos nas demais frações (Quadro 3). Nos Luvisolos, os acréscimos foram, principalmente em P-res, Po-bic e Pi-hid, e decréscimos nas demais. Isso pode dar uma indicação das frações que estariam mantendo o P-lábil, nas duas classes de solo. As frações Po-hid e P-ác, tradicionalmente consideradas pouco lábeis, e Prdu, considerada a fração mais estável (WAGAR et al., 1986; TIESSEN et al., 1984; SCHONENAU et al., 1989), possivelmente participaram na reposição do P lábil nas duas classes de solos, fato confirmado também no experimento após cultivo. Portanto, essas frações têm um papel preponderante no processo de manutenção do fósforo disponível, nos solos de semi-árido.

Quadro 4 - Proporções médias dos decréscimos e acréscimos, em relação ao seu valor inicial, nas frações de P do solo, após quatro meses de incubação. Valores negativos significam decréscimos e positivos, acréscimos

Horiz	P-res	Pi-bic	Po-bic	Pi-hid	Po-hid	P-ác	Prdu	Ptotal	Precup
-----%-----									
<b>Latossolos</b>									
<b>Terço superior</b>									
A	-81	+15	+18	-6	-19	-14	-2	-7	19
BA	-41	+3	+27	+1	-31	-0	-3	-6	59
Bw1	-18	+66	-31	-3	-41	+7	-2	-5	82
<b>Terço médio</b>									
A	-83	-15	+73	-15	-17	-24	-2	-12	17
BA	-37	+46	-12	+3	-25	-3	-4	-9	63
Bw1	-27	-19	+24	-1	-31	-5	-5	-9	73
<b>Terço inferior</b>									
A	-70	-3	+75	-17	-14	-18	-5	-10	30
BA	-45	+25	+12	-14	-24	-18	-4	-11	55
Bw1	-28	+19	-4	-10	-31	-15	-3	-8	72
<b>Luvissolos</b>									
<b>Terço superior</b>									
A	-81	-22	+13	+10	-19	-24	-2	-13	19
Bt	-45	-34	-11	+13	-37	+31	-3	-4	55
<b>Terço médio</b>									
A	-81	-27	+13	+12	-25	-22	-3	-12	19
Bt	-7	-41	+4	+19	-38	+32	-2	-5	93
<b>Terço inferior</b>									
A	-72	-16	+15	+13	-22	-25	-4	-13	28
Bt	-27	-17	+12	+16	-30	+14	-3	-2	73

Horiz.= horizontes; res = resina; i = inorgânico; o = orgânico; bic = bicarbonato; hid = hidróxido; ác = ácido; rdu = residual.; recup. = recuperado após dez extrações sucessivas; pl = planta; extsuc = recuperado após dez extrações sucessivas. A. gr. = areia grossa; e Al-dit = alumínio extraído por ditionito-citrato-bicarbonato de sódio.

### 3.3. Análises de correlação

No experimento em casa de vegetação, tanto nos Latossolos como nos Luvissolos, os decréscimos nas frações inorgânicas de P após cultivo foi significativamente correlacionado com o potássio e o carbono (Quadro 5), resultado que foi confirmado na maioria dos casos no experimento com incubação (Quadro 5). Houve uma consistência com os resultados do capítulo anterior, em que as concentrações de P nessas frações também foram altamente correlacionados com o potássio e com o carbono. Os resultados reforçam a hipótese de que a matéria orgânica e compostos de fósforo contendo potássio podem estar controlando as fontes de fósforo lábil nesses solos. Nos Luvissolos, o efeito do cultivo e da incubação também

Quadro 5 - Correlações entre os decréscimos nas frações de P e propriedades selecionadas do solo, após quatro meses de cultivo em casa de vegetação e de incubação, em Latossolos e Luvisolos

Experimento com Plantas										
	Latossolos					Luvisolos				
	P-res	Pi-bic	Po-bic	Pi-hid	P-pl	P-res	Pi-bic	Pi-hid	P-ác	P-pl
Argila	-0,54**	-0,45*			-0,47*	-0,69**	-0,63**	-0,69**	-0,56*	-0,67**
A. gr.						0,57*	0,60**	0,72**	0,51*	0,69**
pH						-0,76**	-0,61**	-0,79**	-0,68**	-0,72**
Ca	0,39*	0,53**								
K	0,62**	0,43**		0,40*	0,59**	0,70**		0,58*	0,62**	0,50*
C	0,76**	0,69**		0,68**	0,80**	0,80**	0,64**	0,78**	0,61**	0,75**
Al-dit	-0,49**				-0,39*					
P-res		0,85**	-0,39*	0,52**	0,94**		0,89**	0,94**	0,82**	0,92**
Pi-bic			-0,69**	0,62**	0,85**			0,87**	0,70**	0,90**
Po-bic				-0,47*	-0,49**					
Pi-hid					0,63**				0,79**	0,91**
P-ác										0,84**
M. S.	0,93**	0,84**	-0,47**	0,59**	0,97**	0,94**	0,89**	0,92**	0,81**	0,98**

Experimento com incubação										
	Latossolos					Luvisolos				
	P-res	Pi-bic	Po-bic	Pi-hid	P-ác	Pextsuc	P-res	P-ác	Pextsuc	
Argila	-0,57**					-0,48*	-0,68**	-0,64**	-0,57*	
A. gr.							0,50*		0,55*	
pH							-0,72**	-0,68**	-0,76**	
Mg							-0,50*	-0,52*		
Ca	0,51**	0,69**	-0,48*			0,55**				
K	0,45*		-0,42*				0,68**	0,70**	0,56*	
C	0,67**		-0,78**	0,61**	0,53**	0,56**	0,67**	0,69**	0,67**	
Al-dit	-0,46*					-0,45*				
P-res		0,65**	-0,57**	0,51**	0,37*			0,84**	0,86**	
Pi-bic			-0,66**	0,48*						
Po-bic				-0,64**	-0,56**	-0,53**				
Pi-hid					0,50**	0,52**				
P-ác										0,90**

foram altamente correlacionados com algumas frações granulométricas e com pH (Quadro 5).

Nos Latossolos, entre as frações granulométricas, houve apenas uma correlação com argila, que foi confirmado no experimento de incubação. Tanto nos Latossolos como nos Luvisolos, o efeito do cultivo em P-res foi significativamente altamente correlacionado com frações inorgânicas: Pi-bic e Pi-hid nos Latossolos e Pibic, Pi-hid e Pác, nos Luvisolos (Quadro 5). A correlação com Pi-bic e Pi-hid nos Latossolos e com P-ác nos Luvisolos, foi

confirmada pelo efeito da incubação (Quadro 5). Nos Latossolos, a dinâmica de P lábil do solo parece ser controlada pelos reservatórios de Po, concordantemente com trabalho de BECK e SANCHEZ (1994), que encontraram 44% do Po respondendo pelos aumentos em P-lábil, e com o de TIESSEN et al. (1984), que encontraram em 29 Ultissolos de diferentes áreas, 80% da variação de P lábil explicada pelo P orgânico. Como as frações Pi-bic e Pi-hid foram altamente e inversamente correlacionadas com Po-bic e, altamente e positivamente com Pres (Quadro 5), parece que, em condições ideais para mineralização, o Po-bic poderá decrescer, transformando-se em Pi-bic e Pi-hid, que por sua vez poderão suprir P-res à medida que esta for depletada pelas plantas. A produção de matéria seca foi altamente correlacionada com o P absorvido pelas plantas e este, altamente correlacionado com o P mais lábil, Pres e Pi-bic, nas duas áreas.

## 4. CONCLUSÕES

1. O fósforo disponível, medido pelo fósforo absorvido pelas plantas, decresceu em profundidade e foi consistente com a produção de matéria seca, não apresentando, em ambos os casos, diferenças marcantes entre posições na encosta, nas duas classes de solo.

2. Os decréscimos em P causados pelo cultivo foram maiores nas frações inorgânicas do que nas orgânicas. Ambas as formas, na maioria dos casos, não apresentaram diferenças significativas nem entre posições na vertente nem entre profundidades, mas tenderam a ser maiores nos horizontes superficiais.

3. Após cultivo, as frações P-res e Pi-bic foram as que mais decresceram em valores proporcionais.

4. Com a incubação, os maiores decréscimos ocorreram em P orgânico e os maiores acréscimos, nas frações mais lábeis (P-res, Pi-bic e Po-bic), nos Latossolos e em Pi-hid seguida de P-res e Po-bic, nos Luvisolos.

5. Os efeitos totais do cultivo não apresentaram diferenças significativas entre Latossolos e Luvisolos, com médias de 46 e 35 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente, confirmadas pelo experimento de incubação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADEPETU, J.A., COREY, R.B. Changes in N and P availability and P fractions in two soils from Nigeria under intensive cultivation. **Plant and Soil**, n.46, p.309-316, 1977.
- ARAÚJO, M.S.B., SALCEDO, I.H. Formas preferenciais de acumulação de fósforo em solos cultivados com cana-de-açúcar na Região Nordeste. **R. Bras. Ci. Solo**, n.21, p.643-650, 1997.
- ARAÚJO, M.S.B., SALCEDO, I.H., SAMPAIO, E.V.S.B. Efeito de fertilizações fosfatadas anuais em solos cultivados com cana-de-açúcar. II. Formas disponíveis e efeito residual do P acumulado. **R. Bras. Ci. Solo**, n.17, p.397-403, 1993.
- ARMSTRONG, R.D., HELYAR, K.R. Changes in soil phosphate fractions in the rhizosphere of semi-arid pasture grasses. **Aust. J. Soil Res.**, n.30, p.131-143, 1992.
- BANIK, S., DAY, B.K. Available phosphorus content of an alluvial soil as influenced by inoculation of some isolated phosphate-solubilizing microorganisms. **Plant and Soil**, n.69, p.353-364, 1981.
- BARROW, N.J. The slow reactions between soil and anions. 1. Effects of time, temperature and water content of a soil on the decrease in effectiveness of phosphate for plant growth. **Soil Sci.**, n.118, p.380-386, 1974.
- BECK, M.A., ELSENBEER, H. Biogeochemical cycles of soil phosphorus in southern Alpine spodosols. **Geoderma**, n.91, p.249-260, 1999.
- BECK, M.A., SANCHEZ, P.A. Soil phosphorus fraction dynamics during 18 years of cultivation on a Typic Paleudult. **Soil Sci. Am. J.**, n.58, p.1424-1431, 1994.
- BRAMLEY, R.G.V., BARROW, N.J. The reaction between phosphate and dry soil. II. The effect of time, temperature and moisture status during incubation on the amount of plant available P. **J. Soil Sci.**, n.43, p.759-766, 1992.
- BROOKES, P.C., POWLSON, D.S. Preventing phosphorus losses during perchloric acid digestion of sodium bicarbonate soil extracts. **J. Sci. Food Agric.**, n.32, p.671-674, 1981.
- CONDON, L.M., GOH, K.M. Effects of long-term phosphatic fertilizer applications on amounts and forms of phosphorus in soils under irrigated pasture. **N. Z. J. Soil Sci.**, n.40, p.383-395, 1989.

- CONDRON, L.M., GOH, K.M. Nature and availability of residual phosphorus in long-term fertilized pasture soils. **N. Z. J. Agric. Sci.**, n.114, p.1-9, 1990.
- CREWS, T.E. The supply of phosphorus from native, inorganic phosphorus pools in continuously cultivated Mexican agroecosystems. **Agric. Ecosyst. Environ.**, n.57, p.197-208, 1996.
- EL-SWAIF, S.A., CALDWELL, R.C. Potential crop productivity of Alfisols and Vertisols in the semi-arid tropics. In: JOHANSEN, C., LEE, K.K., SAHARAWAT, K.L. (Eds.) **Phosphorus nutrition of grain legumes in the semi-arid tropics**, 1991. 251p.
- EPSTEIN, E. **Mineral nutrition of plants: Principle and perspectives**. New York: J. Wiley, 1972. 412p.
- FARIA, C.M.B. **Práticas que favorecem a capacidade produtiva do solo na agricultura de sequeiro do semi-árido brasileiro**. Petrolina: EMBRAPA-CPATSA, 1992. 30p. (Circular Técnica 28).
- GOH, K.M., CONDRON, L.M. Plant availability of phosphorus accumulated from long-term applications of superphosphate and effluent to irrigated pastures. **N. Z. J. Agric. Res.**, n.32, p.45-51, 1989.
- HEDLEY, M.J., STEWART, J.W.B., CHAUHAN, B.S. Changes in inorganic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, n.46, p.970-976, 1982a.
- HEDLEY, M.J., WHITE, R.E., NYE, P.H. Plant-induced changes in the rhizosphere of rape (*Brassica napus* var. emerald) seedlings. **The New Phytologist**, n.91, p.45-56, 1982b.
- HELAL, H.M., SAUERBECK, D.R. Influence of plant roots on C and P metabolism in soil. **Plant and Soil**, n.76, p.175-82. 1984.
- ICRISAT. International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics. **Phosphorus nutrition of grain legumes in the semi-arid tropics** In: JOHANSEN, C., LEE, K.K., SAHARAWAT, K.L. (Eds.), 1991. 251p.
- KAMPURATH, E.J. Appropriate measurements of phosphorus availability in soils of the semi-arid tropics. In: JOHANSEN, C., LEE, K.K., SAHARAWAT, K.L. (Eds.) **Phosphorus nutrition of grain legumes in the semi-arid tropics**, 1991. 251p.
- KANWAR, J.S. **Reds soils of the semi-arid tropics - problems, potentials and management**. In : Proceedings of the International Symposium on Red Soils, p. 504-522. Amsterdam: The Netherlands: Elsevier. 1986.

- LAJTHA, K., SCHLESINGER, W.H. The biogeochemistry of phosphorus cycling and phosphorus availability along a desert soil chronosequence. **Ecology**, n.69, p.24-39, 1988.
- LINDSAY, W.L., MORENO, E.C. Phosphate phase equilibria in soils. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, n.24, p.177-182, 1960.
- LINDSAY, W.L. **Chemical equilibria in soils**. New York: John Wiley e Sons, 1979. 449p.
- MOGHINI, A., LEWIS, D.G., OADES, J.M. Release of phosphate from calcium phosphates by rhizosphere products. **Soil Biol. Biochem.**, n.10, p.277-281, 1978.
- MURPHY, J., RILEY, J.P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Anal. Chem. Acta**, n.27, p.31-36. 1962.
- O'HALLORAN, I.P., STEWART, J.W.B., KACHANOSKI, R.G. Influence of texture and management practices on the forms and distribution of soil phosphorus. **Can. J. Soil Sci.**, n.67, p.147-163, 1987.
- OLSEN, R.G., COURT, M.N. Effect of wetting and drying of soils on phosphate adsorption and resin extraction of soil phosphate. **J. Soil Sci**, n.33, p.709-717, 1982.
- RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e adubação**. São Paulo: Ceres, Potafos, 1991. 343p.
- ROBERTS, T.L., STEWART, J.W.B. **Update of residual fertilizer phosphorus in western Canadian soils**. Institute of Pedology, University of Saskatchewan, 1987, p1-15. (Public., 523).
- SCHOENAU, J.J., STEWART, J.W.B., BETTANY, J.R. Forms and cycling of phosphorus in prairie an boreal forest soils. **Biogeochemistry**, n.8, p.223-237, 1989.
- SAMPAIO, E.V.S.B., SALCEDO, I.H., SILVA, F.B.R. Fertilidade de solos do semi-árido do Nordeste. In: PERREIRA, J.R., Faria, C.M.B. (Eds). **Fertilizantes** - insumos básicos para a agricultura e combate à fome. Petrolina: EMBRAPA-CPATSA / SBCS, pp. 51-71, 1995.
- STARTSOFT, INC. **STATISTICA for Windows**, Release 5.0. Copyright© StartSoft, Inc. , 1984-1995.
- SWINDALE, L.D. **Distribution and use of arable soils in the semi-arid tropics**. In: Managing soil resources, p.67-100, Plenary Sessions Papers, Transactions of the 12<sup>th</sup> International Congress of Soil Science, New Delhi, India, Indian Society of Soil Science, 1982.

- THOMAS, R.L., SHEARD, R.W., MOYER, J.R. Comparison of conventional and automated procedures for N, P and K analysis of plant material using a single digestion. **Agron. J.**, n.59, p.240-243, 1967.
- TIESSEN, H., SALCEDO, I.H., SAMPAIO, E.V.S.B. Nutrient and soil organic matter dynamics under shifting cultivation in semi-arid northeastern Brazil. **Agric. Ecosyst. Environ.**, n.38, p.139-151, 1992.
- TIESSEN, H., STEWART, J.W.B., COLE, C.V. Pathways of phosphorus transformation in soils of differing pedogenesis. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, n.48, p.853-858, 1984.
- WAGAR, B.J., STEWART, J.W.B., MOIR, J.O. Changes with time in the form and availability of residual fertilizer phosphorus on chernozemic soils. **Can. J. Soil Sci.**, n.66, p.105-119, 1986.
- WALKER, T.W., SYERS, J.K. The fate of phosphorus during pedogenesis. **Geoderma**, n.15, p.1-19, 1976.
- WILLIAMS, J.D.H., MAYER, T., NRIAGU, J.O. Extractability of phosphate minerals common in soils and sediments. **Soil. Sci. Soc. Am. J.**, n.44, p.462-465. 1980.

## CAPÍTULO 3

### DESSORÇÃO DE FÓSFORO EM LATOSSOLOS E LUVISSOLOS DO SEMI-ÁRIDO DE PERNAMBUCO: MINERALOGIA E EFEITOS DE CICLOS DE UMEDECIMENTO E SECAGEM

#### RESUMO

Devido à distribuição irregular das chuvas no semi-árido, os solos dessa região são freqüentemente submetidos a episódios de umedecimento/secagem, que podem influenciar nas transformações de fósforo no solo. Esses ciclos podem favorecer a adsorção de fósforo do fertilizante, mas existe pouca informação sobre os processos de adsorção/dessorção em solos do semi-árido nordestino. Amostras dos dois horizontes mais superficiais de perfis dos terços superior, médio e inferior de três toposeqüências de Latossolos e três de Luvisolos do semi-árido de Pernambuco, receberam fósforo em solução de  $\text{CaCl}_2$   $0,001 \text{ mol L}^{-1}$ , nas doses de 28,57; 57,14; 142,9; 285,7; 428,6; e 571,4  $\text{mg L}^{-1}$  correspondendo a 0, 5, 10, 25, 50, 75 e 100% da capacidade máxima de adsorção de fosfato, e foram incubados durante quatro meses, submetidos a dois tratamentos: 1) umedecimento constante, a 80% da capacidade máxima de retenção de água e; 2) doze ciclos de umedecimento e secagem. Foi determinado o P dessorvido e este relacionado com a textura e as quantidades de minerais presentes na fração argila, Fe-ox, Fe e Al-dit. Em geral a dessorção foi menor nos Latossolos do que nos Luvisolos e nos horizontes subsuperficiais do que nos superficiais. Isto foi relacionado às quantidades de argila e óxidos de ferro e alumínio presentes no solo. Embora, praticamente não tenha havido diferenças na adsorção de fosfato entre os dois tratamentos, houve tendência de maior dessorção do fósforo aplicado nas amostras submetidas a ciclos de umedecimento/secagem do que nas mantidas sob umidade constante, nas duas classes de solo. As quantidades de P dessorvidas variaram muito pouco entre as posições na encosta, que pode ter sido um resultado da similaridade da mineralogia da fração argila ao longo da vertente. A recuperação do P aplicado, extraído com água, após quatro meses de contato com o solo chegou a 40-50% nos Luvisolos e 30-

40% nos Latossolos. Esta baixa fixação de fósforo indica que uma grande proporção do P do fertilizante pode permanecer biodisponível após umedecimento e secagem, sugerindo que uma grande eficiência de uso do fertilizante pelas plantas poderia ser esperada.

## **SUMMARY**

### **P DESORPTION IN OXISOLS AND LUVISOLS OF SEMI-ARID AREA OF PERNAMBUCO: MINERALOGY AND WETTING/DRYING CYCLE EFFECTS**

Soils of semi-arid region are frequently submitted to wetting-drying cycles due to irregular rainfall distribution. These cycles can favor adsorption of fertilizer phosphorus but there is little information on adsorption / desorption in relation to soils of Northeast Brazil. Topsoil samples of three Oxisols and Luvisols toposequences in a semi-arid area of Pernambuco received P rates of 0, 5, 10, 25, 50, 75 e 100% of the maximum P sorption capacity. P was applied as  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  in a 0.001 M  $\text{CaCl}_2$  solution. Desorbed P was determined in samples after incubation during four months, under two treatments: 1) constant soil moisture (80% of the maximum water capacity retention); and 2) twelve wetting and drying cycles. Desorbed P was measured after extraction with deionized water and the sample values were related to their texture and contents of dominant clay minerals, Fe-oxalate, Fe and Al-dithionite. In general, P desorption was less in the Oxisols than in the Luvisols, and less in the subsuperficial than in the superficial horizons. This was related to the amounts of clay and Fe and Al oxides. Although there was hardly any difference in the P adsorption between the two treatments, P desorption tended to be larger in the samples submitted to wetting/drying cycles. Desorbed P varied little among slope positions, within the two soils classes, probably as a result of their similar clay mineralogy. Recovery of applied P by extraction with deionized water reached up to 40-50% in Luvisols and 30-40% in Oxisols. This low P fixation indicates that a large proportion of fertilizer P may remain bioavailable after wetting and drying, thus, large plant use efficiency could be expected.

## 1. INTRODUÇÃO

Os efeitos de ciclos de umedecimento e secagem sobre a adsorção e dessorção de P no solo estão associados, principalmente, com mudanças na estrutura do solo (BIRCH, 1958; BECKETT e WHITE, 1964; NEVO e HAGIN, 1966). As mudanças físicas decorrentes dos processos de expansão e contração aumentam a susceptibilidade do solo à desagregação (LEHRSCHE et al., 1991), resultando em partículas menores e expondo mais superfícies reativas. Assim, o solo aumenta a afinidade para P pela exposição de novos sítios de adsorção (BECKETT e WHITE, 1964), podendo causar um acréscimo ou um decréscimo no P disponível. Isto vai depender, entre outros fatores, do tempo de contato de P com a superfície. Neste caso, a adsorção de P será afetada não apenas pelo conteúdo de água do solo em si, mas também por um processo físico causado pela variação de umidade, que pode alterar a estrutura do solo e expor novos sítios de adsorção.

Os solos do semi-árido são sazonalmente submetidos a episódios de umedecimento/secagem, pela distribuição irregular das chuvas, com curtos períodos de chuvas intensas e longos períodos de estiagem, que podem influenciar nas transformações de fósforo no solo. Estudos medindo a dessorção de fósforo em solos do semi-árido nordestino sob estas condições praticamente inexistem. Esses estudos são importantes na medida que os processos de adsorção/dessorção têm uma grande influência

na disponibilidade de P para as plantas e nas perdas de P ao longo do perfil.

Existem muitos trabalhos na literatura sugerindo que o processo de adsorção é favorecido em solos submetidos a ciclos de umedecimento/secagem, comparados a solos mantidos úmidos (BECKETT e WHITE, 1964; BARROW e SHAW, 1980; OLSEN e COURT, 1982). Na prática, este é um dos motivos pelo qual pouco se fertiliza no sertão, o medo de que o fertilizante seja perdido se as chuvas foram insuficientes para manter a cultura durante seu ciclo, embora concretamente existam muito poucos estudos em áreas de semi-árido. Entretanto, o processo de adsorção que a literatura sugere ser favorecido em solos com alternância de umedecimento/secagem, parece ser bastante reversível. No trabalho de BARROW e SHAW (1980) a dessorção, que é uma medida de quão forte são as forças de ligação na adsorção, ocorreu quase que totalmente após incubação com reumedecimento por curtos períodos, e maior até que em solos que foram mantidos úmidos (OLSEN e COURT, 1982). Esta reversibilidade pode tornar viável o uso de fertilização fosfatada em áreas do semi-árido, para aumentar a produtividade.

Outro fator que pode favorecer a dessorção de P em solos de semi-árido é o fato de que são solos mais jovens, mais preservados devido às condições climáticas, e em princípio, pouco favoráveis ao dreno de P pelos minerais do solo. As superfícies adsorventes mais comuns em solos ácidos são, goethita, hematita, gibbsita e caulinita, que possuem na superfície íons  $\text{OH}^-$  e moléculas de água que estão coordenadas a íons  $\text{Fe}^{3+}$  ou  $\text{Al}^{3+}$  (PARFITT, 1978; FONTES e WEED, 1996). Além desses sítios, pode também ocorrer adsorção de P na superfície de  $\text{CaCO}_3$ , no caso de solos neutros ou calcários (COX, 1994; PARFITT, 1978). Portanto, os processos de adsorção/dessorção de P podem estar diretamente ligados à mineralogia do solo.

O objetivo desse trabalho foi determinar a dessorção de fósforo aplicado a duas classes de solo representativas do sertão de Pernambuco, uma mais intemperizada, Latossolos, e uma menos intemperizada, Luvisolos, submetidos a umidade constante e a doze ciclos de umedecimento/secagem durante quatro meses. A adsorção de fósforo foi relacionada à mineralogia da fração argila, nas duas classes de solo,

supostamente com caráter dreno diferenciado. As hipóteses a serem testadas foram: 1- Entre tratamentos, as amostras de solos submetidas a ciclos de umedecimento/secagem teriam uma maior dessorção de fósforo, comparadas às mantida sob umidade constante; e 2- Entre classes de solo, a dessorção seria menor nos Latossolos que nos Luvisolos, por possuírem os primeiros um maior caráter dreno, devido à mineralogia mais oxídica, favorável ao processo de retenção de P.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

Amostras de solos foram retiradas de perfis do terço superior, médio e inferior de três toposseqüências de Latossolos e de três de Luvisolos, localizadas nos Municípios de Santa Rita e Parnamirim, respectivamente, no semi-árido de Pernambuco. As amostras foram secas ao ar, destorroadas, passadas em peneira de 2 mm de malha e determinadas suas características físicas (granulometria, capacidade de campo e densidade aparente) e químicas (pH, Ca, Mg, K, Na, Al+H, C, P, Fe e Al ), cujas metodologias e valores médios estão descritos no capítulo I.

### 2.1. Experimento

Subamostras de 10 g de solo dos horizontes superficiais e imediatamente subsuperficiais receberam 5 ml de uma solução de  $\text{CaCl}_2$   $0,001 \text{ mol L}^{-1}$  contendo 28,57; 57,14; 142,9; 285,7; 428,6; e 571,4  $\text{mg L}^{-1}$  de fósforo como  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ , correspondente a 0, 10, 25, 50, 75 e 100% da capacidade máxima de adsorção (114,2  $\text{mg/L}$ ), que foi igual para as duas classes de solo. A capacidade máxima de adsorção foi estimada a partir do P remanescente (ALVAREZ V., 1990), ajustando-se os valores para a quantidade de solo utilizada no experimento. As amostras foram homogeneizadas e secas ao ar. O experimento consistiu de dois tratamentos, com duas repetições: 1) com umedecimento constante, onde as

amostras foram umedecidas a 80% da capacidade de retenção de água a 1/3 bar, acondicionadas em sacos plásticos fechados e sua umidade periodicamente ajustada para a condição inicial; e 2) com 12 ciclos de umedecimento e secagem, adicionando-se água a 100% da capacidade de retenção de água no solo a 1/3 bar, a cada 8-10 dias e as amostras acondicionadas em sacos plásticos abertos. Os dois conjuntos de amostras foram mantidos em casa de vegetação durante quatro meses. O experimento com ciclos de umedecimento e secagem finalizou com os solos secos. No mantido com umidade constante, após o período de incubação, os solos foram secos ao ar. A quantidade de P dessorvida foi medida nas subamostras de solo dos dois tratamentos, colocando-se 0,5 g de solo com 30 ml de água desmineralizada e agitando-se durante 16 h. A suspensão foi centrifugada e a concentração de P no sobrenadante foi determinada colorimetricamente (MURPHY e RILEY, 1962). As quantidades de P adsorvidas foram calculadas pela diferença entre o P adicionado e o P medido no sobrenadante.

Gráficos de correlação foram traçados entre o fósforo aplicado e o fósforo dessorvido, por horizonte em cada posição na encosta e por tratamento, em cada classe de solo. As curvas foram ajustadas linearmente e as equações com os respectivos coeficientes de determinação descritos em cada gráfico.

## **2.2. Caracterização mineralógica**

Para esta caracterização foram utilizadas amostras de todos os horizontes de cada perfil amostrado. Em subamostras de solo foi feita a remoção da matéria orgânica, devido ao seu efeito agregante. Essas subamostras foram lavadas, previamente, com NaOAc 1 mol L<sup>-1</sup> (acetato de sódio), pH 5, para retirada dos carbonatos de Ca e Mg, para uma dispersão mais efetiva do solo (JACKSON, 1969). Após essa lavagem, as amostras foram tratadas com um agente oxidante, o hipoclorito de sódio (ANDERSON, 1963), para remoção da matéria orgânica. Depois desse tratamento, as amostras foram lavadas duas vezes com NaCl 1 mol L<sup>-1</sup> para dispersão do solo com saturação de sódio.

Nas amostras assim tratadas procedeu-se a separação das frações granulométricas, areia, silte e argila, de acordo com o princípio da velocidade de sedimentação da equação de Stokes, utilizando-se o método da EMBRAPA (1997). As frações separadas foram colocadas para secar em estufa a 40°C. A argila seca foi moída em almofariz e passada em peneira de 0,210 mm e desferrificada utilizando-se extração com DCB (ditionito-citrato-bicarbonato) (MEHRA e JACKSON, 1960) e oxalato de amônio pH 3,0 (SCHWARTMANN, 1964). As argilas total e desferrificada foram analisadas por difração de raio X (DRX) para a identificação dos minerais presentes. Os difratogramas foram obtidos a partir de lâminas orientadas numa escala horizontal de 4 cm/min. O difratômetro, equipado com tubo de cobre e utilizando radiação CuK, foi operado com 25 mA e 35 kV, em todas as análises realizadas.

### **3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

#### **3.1. Mineralogia da fração argila**

##### **3.1.1. Latossolos**

Os minerais de argila da fração argila dos Latossolos foram caulinita (reflexões a 0,713, 0,357 e 2,35 nm), Ilita (reflexões entre 0,99 a 1,00 nm e 2<sup>a</sup> ordem a 0,54 nm), vermiculita com hidroxí entre camadas ou VHE (reflexões entre 1,20 e 1,32 nm, com fraco colapso ao aquecimento e expansão negligível quando glicolada) (Quadro 1). Entre os minerais primários, quartzo (0,433 e 0,331 nm ) e feldspato potássico (0,320 e 0,295 nm). As seqüências dos minerais presentes estão em ordem decrescente de suas proporções (Quadro 1).

Na toposseqüência 1, houve predomínio absoluto de caulinita, com a presença de ilita nos horizontes superficiais dos terços superior e médio e menor proporção no terço inferior, exceto no horizonte B plíntico. Nos horizontes Bw, a VHE presente foi mais destacada nos perfis de montante, com menor participação nos perfis do terço inferior. A presença de ilita e, ou, feldspato potássico na fração argila de praticamente todos os horizontes ilustra a considerável reserva de K nos Latossolos do sertão aqui representados.

Quadro 1 - Relação dos minerais de argila presentes em perfis de toposse-  
quências de Latossolos do semi-árido de Pernambuco

Horizontes	Secundários	Primários
<b>Topossequência 1</b>		
<b>Terço superior</b>		
A	Ct >> IL > VHE	Qtz > Fd-K
BA	Ct >> IL > VHE	Qtz > Fd-K
Bw1	Ct > VHE > IL	Qtz .
Bw2	Ct >> IL = VHE	Qtz = Fd-K
<b>Terço médio</b>		
A1	Ct >> IL = VHE	Qtz = Fd-K
A2	Ct >> IL > VHE	Fd-K > Qtz
BA	Ct >> VHE > IL > Esm#	Qtz = Fd-K
Bw1	Ct >> VHE > IL	Qtz = Fd-K
Bw2	Ct >> VHE = IL	Qtz = Fd-K
Bw3	Ct >> VHE = IL	Qtz = Fd-K
<b>Terço inferior</b>		
A	Ct >>> IL	Qtz > Fd-K
BA	Ct >>> IL#	Qtz > Fd-K
Bw1	Ct >>>	Qtz > Fd-K
Bw2	Ct >>>	Qtz = Fd-K
Bw3	Ct >>> IL	Qtz = Fd-K
Bpl	Ct >>> IL > VHE	Qtz = Fd-K
<b>Topossequência 2</b>		
<b>Terço superior</b>		
A	Ct >>> VHE = IL	Qtz
BA	Ct >>>	Qtz > Fd-K
Bw1	Ct >>>	Qtz > Fd-K
Bw2	Ct >>>	Qtz > Fd-K
<b>Terço médio</b>		
A	Ct >> IL	Qtz = Fd-K
BA	Ct >>> IL#	Qtz = Fd-K
Bw1	Ct >>>	Qtz
Bw2	Ct >>> IL = VHE	Qtz#
Bw3	Ct >>> IL = VHE	Qtz#
<b>Terço inferior</b>		
A	Ct >>>	Qtz > Fd-K
BA	Ct >> IL = VHE	Qtz = Fd-K
Bw1	Ct >>> IL > VHE	Fd-K > Qtz#
Bw2	Ct >>>	Fd-K > Qtz#
Bw3	Ct >>>	Fd-K > Qtz
<b>Topossequência 3</b>		
<b>Terço superior</b>		
A	Ct >>> Gb > IL > VHE#	Qtz >> Fd-K
Ba	Ct >>> IL > Gb > VHE#	Qtz > Fd-K
Bw1	Ct >>> Gb > IL# > VHE#	Qtz > Fd-K
Bw2	Ct >>> Gb > IL# > VHE#	Qtz > Fd-K
<b>Terço médio</b>		
A	Ct >> IL > VHE	Qtz > Fd-K
Bw1	Ct > Gb > VHE > IL	Qtz > Fd-K
Bw2	Ct > Gb > VHE > IL	Qtz > Fd-K
<b>Terço inferior</b>		
A	Ct >> IL > VHE#	Qtz > Fd-K
BA	Ct** >> IL > Gb = VHE	Qtz > Fd-K
Bw1	Ct >>> IL > Gb > VHE	Qtz > Fd-K
Bw2	Ct >> Gb > IL > VHE	Qtz > Fd-K

Ct = caulinita; IL = illita; VHE = vermiculita com hidróxi entre camadas; Esm = esmectita; Gb = gibbsita; Qtz = quartzo; Fd-K = feldspato potássico; # = quantidades traço; \* = baixa cristalinidade; e \*\* = muito baixa cristalinidade.

### **3.1.2. Luvisolos**

Os minerais identificados na fração argila dos Luvisolos foram caulinita (reflexões entre 0,713-0,715 e 0,355-0,357 e 0,249 nm e reflexões indicando má cristalização a 0,434 nm), illita (reflexões entre 0,97-1,01 nm e 0,49-0,50 nm), clorita (reflexões a 1,41-1,44 nm, sem expansão no tratamento glicolado, 1,25-1,30, ombro em 0,730 próximo a caulinita 0,713 nm), esmectita (1ª ordem – 1,42 a 1,45 nm, com expansão no tratamento glicolado a 1,65-1,70 nm; 2ª ordem – 0,501, com expansão no tratamento glicolado em 0,82-0,84). Os principais minerais identificados nos DRX das argilas desferrificadas e submetidas aos demais tratamentos são apresentados numa seqüência decrescente de suas proporções (Quadro 2).

### **3.1.3. Dessorção de fosfato**

A recuperação do fósforo adicionado, após quatro meses de contato com o solo, foi maior com o aumento da quantidade adicionada e foi, em geral, similar entre os tratamentos, tanto nos Latossolos como nos Luvisolos, nos dois horizontes (Quadro 3). Isto implica que os efeitos causados pelos ciclos de umedecimento e secagem no processo de adsorção de fosfato interferiram praticamente do mesmo modo nos dois tratamentos, nas duas classes de solo. Este resultado contrasta com a literatura, em que, geralmente, solos submetidos a episódios de molhamento e secagem são mais adsorventes para fosfatos do que aqueles mantidos sob umidade constante (BECKETT e WHITE, 1964; OLSEN e COURT, 1982). Os experimentos mencionados na literatura, contudo, mantiveram P em contato com o solo por um curto período de tempo. Ciclos de molhamento/secagem podem aumentar os sítios de adsorção e, a curto prazo, tornar o contato de P com o solo mais efetivo do que quando mantido sob umidade constante por igual período. Entretanto, quando o tratamento é mantido por um tempo maior, ocorre um maior contato entre P e o solo mantido sob umidade constante, podendo favorecer o processo de adsorção (BARROW, 1974). Portanto, a longo prazo, parece que os efeitos de tratamentos sob umidade constante se igualam aos dos ciclos de

Quadro 2 - Relação dos minerais de argila presentes em perfis de toposseqüências de Luvisolos do semi-árido de Pernambuco

Horizontes	Secundários
	<b>Toposseqüência 1</b>
	<b>Terço superior</b>
A	IL > Ct > Esm > Cl #
Bt1	Ct* = IL > Esm = Cl
Bt2	Ct* = IL > IL/Esm > Esm = Cl
Cr	IL > Ct > IL/Esm > Cl
	<b>Terço médio</b>
A	IL = Ct > Esm
BA	IL > Ct* >> Esm > Cl
Bt	IL = Ct* > Esm > Cl
Cr	IL > Ct* = Esm > Cl
	<b>Terço inferior</b>
A	IL = Ct >> Esm#
Cr1	IL >> Ct* > IL/Esm
Cr2	IL > Ct* > IL/Esm
	<b>Toposseqüência 2</b>
	<b>Terço superior</b>
A	IL = Ct* > Esm
Bt	IL = Ct* > Esm#
Cr	IL = Ct* > Esm
	<b>Terço médio</b>
A	Ct* = IL > Esm
Bt	Ct** > IL > Esm
Cr	Ct** > IL > Esm
	<b>Terço inferior</b>
A	IL > Ct** > Esm
Bt	Esm > IL > Ct**
Btv	Esm > IL/Esm > Cl / IL > Ct**
Cr	Esm > IL > Cl > Ct**
	<b>Toposseqüência 3</b>
	<b>Terço superior</b>
A	IL > Ct** > Esm
Bt	IL > Esm > Ct**
Cr	Esm > IL > Ct** > Cl
	<b>Terço médio</b>
A	IL > Ct* > Esm > Int. E / I
Bt	IL > Ct* > Esm
Cr	IL > Esm > Ct > Cl
	<b>Terço inferior</b>
A	IL > Ct** > Esm
Bt	IL = Ct** > Esm
Cr	IL > Ct** > Esm > Cl

IL = ilita; Ct = caulinita; Esm = esmectita; Cl = clorita; Int. E/I = Interestratificado esmectita/ilita; # = quantidades traço; \* = baixa cristalinidade; e \*\* = muito baixa cristalinidade.

Quadro 3 - Recuperação do fósforo aplicado em amostras de horizontes A e BA de toposseqüências de Latossolos e A e Bt de toposseqüências de Luvisolos, do semi-árido de Pernambuco, submetidas a ciclos de umedecimento e secagem e mantidas sob umidade constante

Paplic	Latosolos				Luvisolos			
	A		BA		A		Bt	
	U/S	U	U/S	U	U/S	U	U/S	U
mg.kg <sup>-1</sup>	----- % -----							
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
30	16,9	17,9	6,3	7,1	20,0	22,0	7,8	6,4
60	22,4	21,5	10,5	10,6	24,2	24,5	9,2	15,6
150	30,4	28,6	20,2	20,9	34,3	31,8	18,8	21,5
300	37,0	31,8	27,3	29,2	45,2	35,6	28,4	30,7
450	38,4	34,8	31,5	31,7	47,7	37,5	33,5	32,6
600	39,0	37,5	34,9	36,6	50,3	43,4	37,1	36,3

Paplic = fósforo aplicado; U/S = ciclos de umedecimento e secagem; e U = mantidas sob umidade constante.

umedecimento/secagem. Além do tempo de duração do experimento, diferenças na adsorção também podem ser explicadas pela estabilidade da estrutura do solo (BARROW e SHAW, 1979). Os solos com estrutura mais estável são menos susceptíveis a uma maior exposição de sítios de adsorção (OLSEN e COURT, 1982), o que poderia minimizar diferenças entre tratamentos com umedecimento/secagem e mantidos sob umidade constante, a longo prazo.

Embora as proporções de P recuperadas tenham sido similares entre os dois tratamentos, nos horizontes A, as amostras submetidas a ciclos de umedecimento e secagem tenderam a uma recuperação maior nos quatro níveis mais altos de P adicionado (Quadro 3). Nos horizontes subsuperficiais a recuperação tendeu a ser mais baixa do que nos horizontes A, sugerindo que os mecanismos de adsorção de P são mais efetivos nos horizontes mais profundos. Nos horizontes A, onde o teor de carbono é mais alto, é possível que os ânions orgânicos estejam competindo com fosfato por sítios de adsorção, favorecendo a recuperação do P aplicado (IYAMUREMYE et al., 1996; BORGGAARD et al., 1990; SINGH e JONES, 1976).

A mineralogia da fração argila foi relativamente uniforme ao longo do perfil, nas três posições na topossequência, predominando caulinita, illita e vermiculita com hidróxi entre camadas nos Latossolos e caulinita, illita e esmectita nos Luvisolos (Quadros 1 e 2). Isto pode explicar a relativa semelhança do P adsorvido ao longo das três posições da vertente. As maiores quantidades de P adsorvido nos horizontes B em relação aos A, é, portanto, atribuível mais a diferenças nos teores de argila e, secundariamente, às quantidades e cristalinidade dos minerais, principalmente caulinita. Os solos apresentaram diferenças nos teores de argila na faixa de 19 a 23% nos Bt dos Luvisolos e de 24 a 33% nos Bw1 dos Latossolos (Quadros 1 e 2 do capítulo 1). Já entre classes de solo existiu uma pequena diferença nos minerais 2:1 presentes, com esmectita predominando nos Luvisolos em detrimento de VHE nos Latossolos. Além da textura mais argilosa nos Latossolos, diferenças nas quantidades dos minerais de argila presentes, provavelmente influenciaram nas quantidades de P adsorvidas (RAMULU, et al., 1967), em cada classe de solo, que tendeu a ser menor nos Luvisolos, resultado esperado para solos menos desenvolvidos e menos argilosos.

As relações Feo/Fed variaram de 0,001 a 0,01, nos Latossolos e 0 a 0,007 nos Luvisolos (Quadros 1 e 2 do Capítulo 1). Em ambas as classes de solo essa relação foi muito baixa, indicando que os óxidos de Fe das amostras têm um predomínio quase absoluto de óxidos de Fe cristalizados. Solos muito intemperizados, como os Latossolos, geralmente apresentam esta relação abaixo de 0,1 (TOREU et al., 1988; FONTES e WEED, 1991; WENDT et al., 1993). Entretanto, os Luvisolos apresentaram uma relação ainda menor que os Latossolos, corroborando a hipótese do capítulo I, que estes solos não se encontram em estágio tão pouco desenvolvido como inicialmente suposto.

A dessorção do fósforo também pode ser avaliada pela correlação obtida entre o fósforo adicionado e o dessorvido (Figuras 1 e 2). O ajuste linear destas relações apresentou altos coeficientes de determinação, que variou entre 0,97 e 0,99. Em geral, houve pouca variação na dessorção entre os dois tratamentos, após quatro meses de incubação. Entretanto, os valores apresentaram algumas tendências. Quanto maior foi a quantidade de

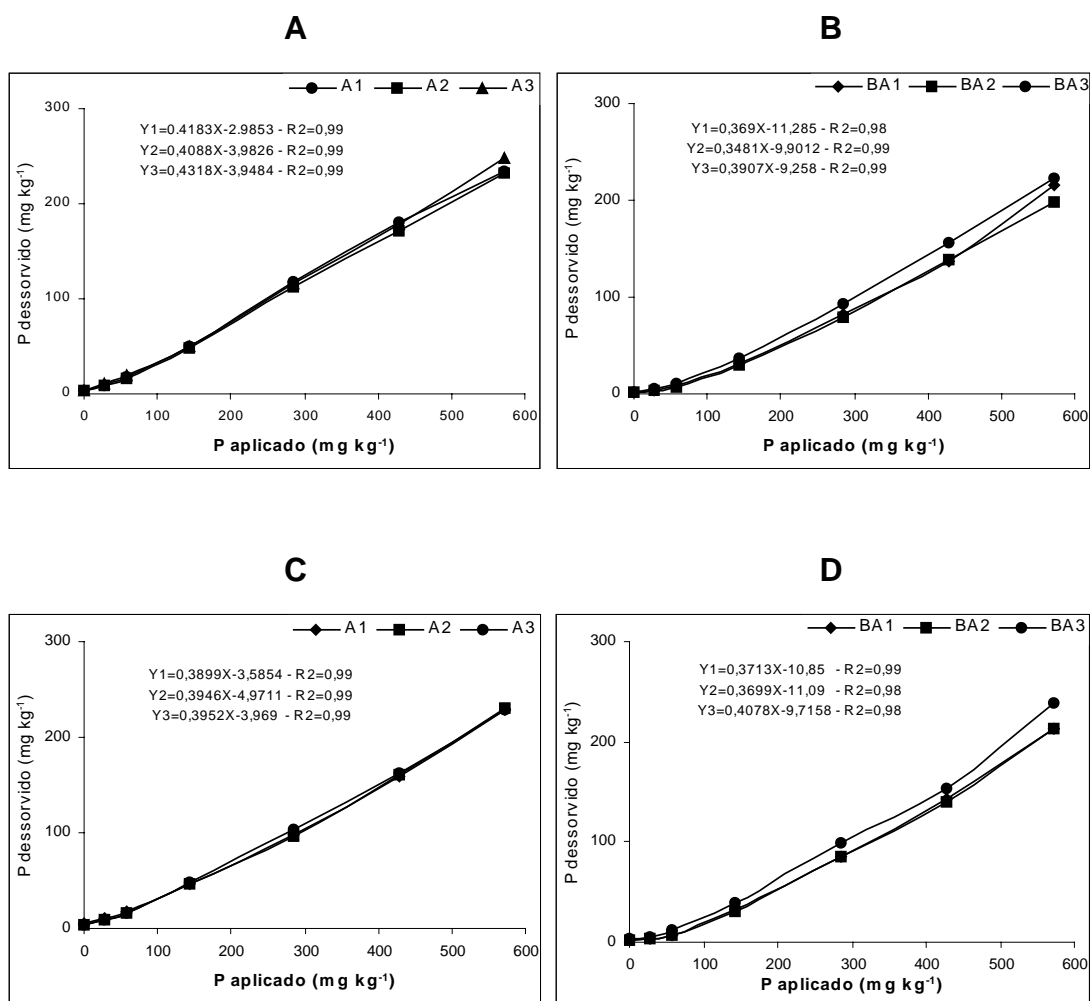


Figura 1 - Correlação entre o fósforo adicionado e o desorvido em amostras de Latossolos do semi-árido de Pernambuco: A e B - amostras de horizontes A e BA, respectivamente, submetidas a ciclos de umedecimento e secagem; C e D - amostras de horizontes A e BA, respectivamente, incubadas com umidade constante. Os índices 1, 2 e 3 correspondem às posições na encosta (terço superior, médio e inferior, respectivamente).

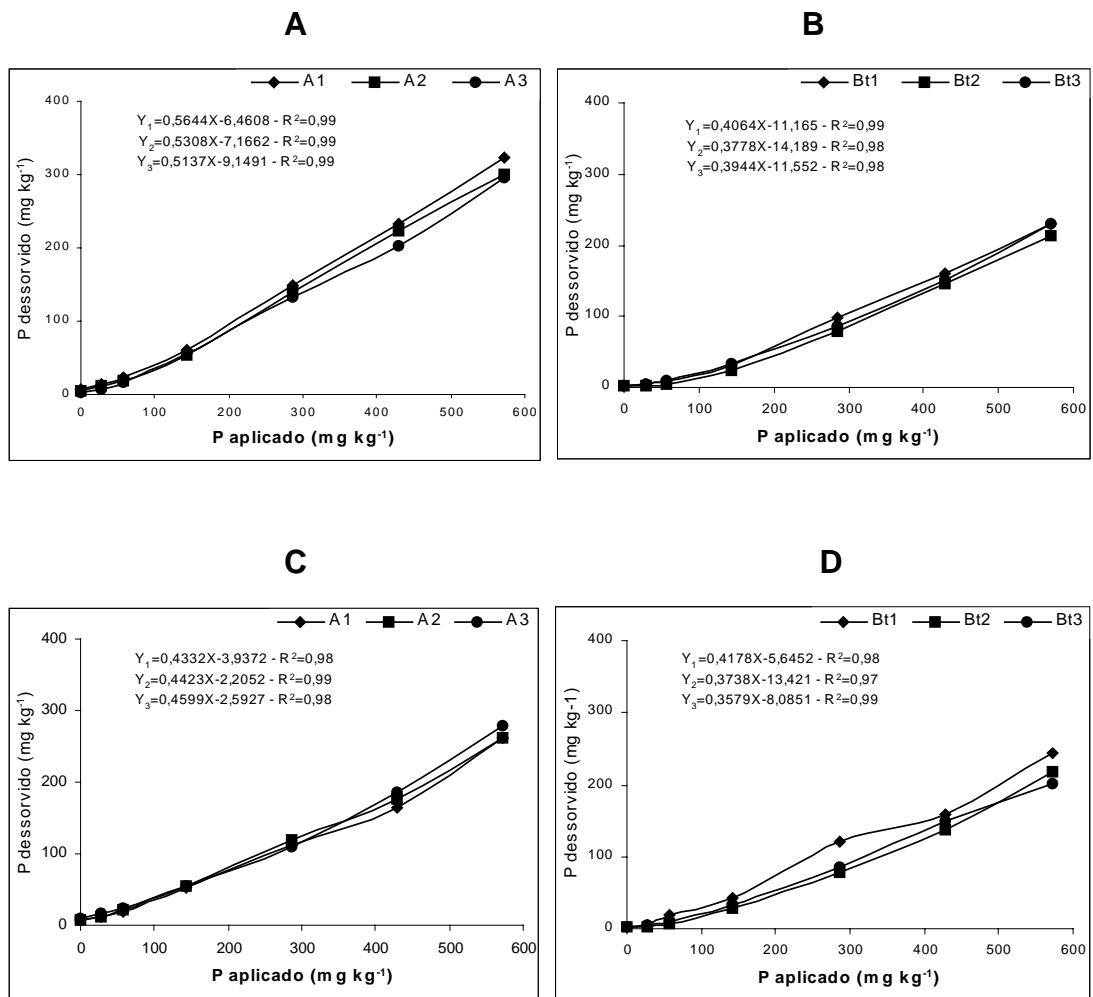


Figura 2 - Correlação entre o fósforo adicionado e o desorvido em amostras de Luvisolos do semi-árido de Pernambuco: A e B - amostras de horizontes A e Bt, respectivamente, submetidas a ciclos de umedecimento e secagem; C e D - amostras de horizontes A e Bt, respectivamente, incubadas com umidade constante. Os índices 1, 2 e 3 correspondem às posições na encosta (terço superior, médio e inferior, respectivamente).

P aplicado, houve uma tendência de maior dessorção. em todos os casos, tanto para os Latossolos como para os Luvisolos, que é indicado pela maior inclinação da curva. Isto foi mais evidente quando se comparou as quantidades dessorvidas entre os horizontes A e B, dentro de um mesmo tratamento, numa mesma classe de solo. Em geral os horizontes B apresentaram maior caráter dreno do que os horizontes A. Esse maior caráter dreno se deveu principalmente a maior quantidade de argila e óxidos de Fe (Feox+Fedit) e de Al (Aldit) (Quadros 1 e 2 do capítulo 1) apresentada nos horizontes B que nos horizontes A, nas duas classes de solo.

Nas duas classes de solo, nos horizontes A, a posição das curvas para o tratamento com ciclos de umedecimento/secagem estava, em geral, levemente mais alta em relação à posição das curvas para o tratamento com umidade constante (Figura 1 e 2). Ou seja, a dessorção tendeu a ser mais favorável nas amostras com ciclos de umedecimento/secagem. Nos horizontes B, praticamente não houve diferenças entre os tratamentos.

Comparando-se entre classes de solo, a inclinação foi maior nos Luvisolos, tanto entre horizontes A como entre horizontes B, nos dois tratamentos. Esses resultados mostram que o processo de adsorção nos Luvisolos, tende a ser mais reversível do que nos Latossolos. O que é bastante justificado, já que os Latossolos possuem maior quantidade de óxidos de Fe e de Al do que os Luvisolos (quadros 1 e 2 do capítulo 1). Como estes óxidos formam ligações fortes (OLSEN e COURT, 1982), isso atribui aos Latossolos maior capacidade de retenção do fosfato. Além disso, os Latossolos, em geral, também apresentaram maiores quantidades de argila.

Entre posições na encosta (representadas pelos índices 1, 2 e 3 em cada gráfico - Figuras 1 e 2), praticamente não houve diferenças nas quantidades de fósforo dessorvidas. Isto demonstra que a qualidade e quantidade da superfície de sorção de fosfato nas três posições é relativamente homogênea.

#### 4. CONCLUSÕES

1. Em geral, a dessorção foi menor nos Latossolos e nos horizontes subsuperficiais, explicado pelas maiores quantidades de argila e óxidos de Fe e Al presentes nesta classe de solo e nestes horizontes.

2. Embora, praticamente não tenha havido diferenças na adsorção de fosfato entre os dois tratamentos, houve tendência de maior dessorção do fósforo aplicado nas amostras submetidas a ciclos de umedecimento/secagem do que nas mantidas sob umidade constante, nas duas classes de solo.

3. As quantidades de P dessorvidas variaram muito pouco entre as posições na encosta, que pode ter sido um resultado da similaridade da mineralogia da fração argila ao longo da vertente.

4. A recuperação do P aplicado, extraído com água, chegou a 40-50% nos Luvisolos e 30-40% nos Latossolos. Esta baixa fixação de fósforo indica que uma grande proporção do P do fertilizante pode permanecer biodisponível após umedecimento e secagem, sugerindo que poderia ser esperado uma grande eficiência de uso do fertilizante pelas plantas

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVAREZ V., V.H., FONSECA, D.M. Definição de doses de fósforo para determinação da capacidade máxima de adsorção de fosfatos e para ensaios em casa de vegetação. **R. Bras. Ci. Solo**, n.14, p.49-55, 1990.
- ANDERSON, J.U. An improved pretreatment for mineralogical analysis of samples containing organic matter. **Clays and Clays Minerals**, n.10, p.380-388, 1963.
- BARROW, N.J., SHAW, T.C. Effects of drying soil on the measurement of phosphate adsorption. **Commun. Soil Sci. Plant Anal.**, n.11, p.347-353, 1980.
- BARROW, N.J., SHAW, T.C. Effects of solution: soil ratio and vigour of shaking on the rate of phosphate adsorption by soils. **J. Soil Sci.**, n.30, p.67-76, 1979.
- BARROW, N.J. The slow reactions between soil and anions. I. Effects of time, temperature, and water content of a soil on the decrease in effectiveness of phosphate for plant growth. **Soil Sci.**, n.118, p.380-386, 1974.
- BECKETT, P.H.T., WHITE, R.E. Studies on phosphate potentials of soils. III. The pool of labile inorganic phosphate. **Plant and Soil**, n.21, p.253-282, 1964.
- BIRCH, H.F. The effect of soil drying on humus decomposition and nitrogen availability. **Plant and Soil**, n.10, p.9-31, 1958.
- BORGGGAARD, O.K., JØRGENSEN, S.S., MØBERG, J.P., RABEN-LANGE, B. Influence of organic matter on phosphate adsorption by aluminum and iron oxides in sandy soils. **J. Soil Sci.**, n.41, p.443-449, 1990.
- COX, F.R. **Current phosphorus availability indices: characteristics and shortcomings**. In: HAVLIN, J.L., JACOBSEN, J.S. (Eds.) Soil Science Society of America, 1994. p. 101-113. (SSSA Special Publication, 40).
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análises de solo**. 2.ed. rev. atual. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212p.
- FONTES, M.P.F., WEED, S.B. Phosphate adsorption by clays from Brazilian oxisols: relationships with specific surface area and mineralogy. **Geoderma**, n.72, p.37-51, 1996.
- FONTES, M.P.F., WEED, S.B. Iron oxides in selected Brazilian Oxisols: Mineralogy. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, n.55, p.1143-1149, 1991.

- IYAMUREMYE, F., DICK, R.P., BAHAM, J. Organic amendments and phosphorus dynamics. I. Phosphorus chemistry and sorption. **Soil Sci.**, n.161, p.426-435, 1996.
- JACKSON, M.L. **Soil chemical analysis** - Advanced Course. 2.ed., Dept. Soil Sci., Univ. Wisconsin, 1969. 881p.
- LEHRSCHE, G.A., SOJKA, R.E., CARTER, D.L. et al. Freezing effects on aggregate stability affected by texture, mineralogy and organic matter. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, n.55, p.1401-1406, 1991.
- MEHRA, O.P., JACKSON, M.L. **Iron oxide removal from soils and clays by dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate.** Washington, DC: 7<sup>th</sup> Natl. Conf. on Clays and Clays Minerals, p.317-327. 1960.
- MURPHY, J., RILEY, J.P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Anal. Chem. Acta**, n.27, p.31-36. 1962.
- NEVO, Z., HAGIN, J. Changes occurring in soil samples during air-dry storage. **Soil Sci.**, n.102, p.157-160, 1966.
- OLSEN, R.G., COURT, M.N. Effect of wetting and drying of soils on phosphate adsorption and resin extraction of soil phosphate. **J. Soil Sci.**, n.33, p.709-717, 1982.
- PARFITT, R.L. Anion adsorption by soils and soil materials. **Advances in Agronomy**, n.30, p.1-50, 1978.
- RAMULU, U.S.S., PRATT, P.F., PAGE, A.L. Phosphorus fixation by soils in relation to extractable iron oxides and mineralogical composition. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, n.31, p.193-196, 1967.
- SCHWERTMANN, U. Differenzierung der Eisenoxide des Bodens durch Extraktion mit Ammoniumoxalat-Lösung. **Z. Pflanzenernähr Bodenkd.** n.105, p.194-192, 1964.
- SINGH, B.B., JONES, J.P. Phosphorus sorption and desorption characteristics of soil as affected by organic residues. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, n.40, p.389-394, 1976.
- TORREY, B.N., THOMAS, F.G., GILLMAN, G.P. Phosphate-sorption characteristics of soils of the North Queensland Coastal Region. **Aust. J. Soil Res.**, n.26, p.465-477, 1988.
- WENDT, J.W., BERRADA, A., GOUGH, M.G., SCHULZE, D.G. Phosphorus sorption characteristics of productive and unproductive Niger soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, n.57, p.766-773, 1993.