

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO – UFPE
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS
ENERGÉTICAS E NUCLEARES

DINÂMICA DE NUTRIENTES EM SOLOS ARENOSOS ADUBADOS
COM ESTERCO BOVINO POR LONGOS PERÍODOS

SANDRA REGINA DA SILVA GALVÃO

RECIFE – PERNAMBUCO – BRASIL

ABRIL/ 2008

SANDRA REGINA DA SILVA GALVÃO

**DINÂMICA DE NUTRIENTES EM SOLOS ARENOSOS ADUBADOS
COM ESTERCO BOVINO POR LONGOS PERÍODOS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares – PROTEN. Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco Área de Concentração: Aplicação de Radioisótopos - Fertilidade de Solos.

ORIENTADOR: PROF. DR. IGNACIO HERNAN SALCEDO

RECIFE – PERNAMBUCO – BRASIL

ABRIL/ 2008

G182d

Galvão, Sandra Regina da Silva.

Dinâmica de nutrientes em solos arenosos adubados com esterco bovino por longos períodos / Sandra Regina da Silva Galvão. - Recife: O Autor, 2008.

xi, 66 folhas, il : figs., tabs.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, 2008.

Inclui Bibliografia.

1. Energia Nuclear. 2.Esterco Bovino - Nutrientes. 3.Fertilidade dos Solos. 4.Solos Arenosos Adubados. I. Título.

UFPE

621.4437

CDD (22. ed.)

BCTG/2008-110

**DINÂMICA DE NUTRIENTES EM SOLOS ARENOSOS ADUBADOS
COM ESTERCO BOVINO POR LONGOS PERÍODOS**

Sandra Regina da Silva Galvão

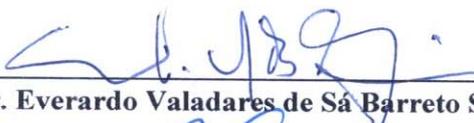
APROVADA EM: 28.04.2008

ORIENTADOR: Prof. Dr. Ignácio Hernan Salcedo

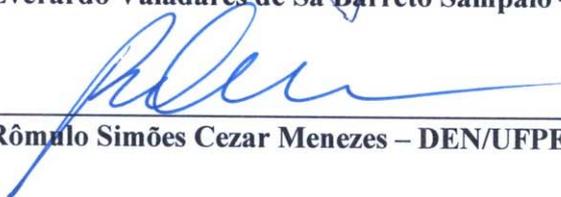
COMISSÃO EXAMINADORA:



Prof. Dr. Ignácio Hernan Salcedo – DEN/UFPE



Prof. Dr. Everardo Valadares de Sá Barreto Sampaio – DEN/UFPE



Prof. Dr. Rômulo Simões Cezar Menezes – DEN/UFPE

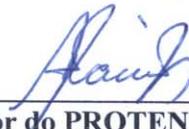


Prof. Dr. Clístenes Williams Araújo do Nascimento – DA/UFRPE



Profa. Dra. Vânia da Silva Fraga – DSER/UFPB

Visto e permitida a impressão



Coordenador do PROTEN/DEN/UFPE

A DEUS, pela vida

À minha mãe **Iolanda Galvão**

Ao meu pai **Silvio Galvão**

À minha irmã **Silvanda Galvão**, meus sobrinhos
Arthur e Amanda Rafaella e à minha afilhada **Thaís**.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Salcedo, expresso meu eterno agradecimento, pela orientação segura, em todas as etapas da preparação deste trabalho, pelo apoio, compreensão e em especial pela atenção e carinho recebidos durante todos esses anos de convivência.

Ao Departamento de Energia Nuclear (DEN) e ao PROTEN, pela oportunidade para a realização deste trabalho.

Ao CNPq, pela concessão da bolsa de estudo.

Ao Inter American for Global Change Research (IAI) e ao CNPq pelo apoio financeiro.

Aos Professores Rômulo Menezes, Everardo V. S. B. Sampaio, Carmem S. M. Masutti e Vânia da Silva Fraga pela participação no comitê de acompanhamento e pelas sugestões que contribuíram com a melhoria de nossa pesquisa e tese.

Aos amigos do Laboratório de Radioagronomia/Fertilidade do Solo (técnicos e estudantes): Clau, Gilberto, Pedrinho, Clarindo, Regina, Fábio, Romildo, Carla, Rafael, Marlon, Patrícia, Priscila, Tereza, Laerte, Leandra, Valdemir, Edmilson e Jackson.

Aos eternos amigos da UFRPE, Prof^a Isabel Galindo, Sandro, Alexandre e Silvana, e suas respectivas famílias, todo o meu agradecimento e carinho.

Aos amigos da Paróquia Nossa Senhora do Rosário pelo apoio, força e fé que me passam, não me deixando dispersar de meus objetivos pessoais e profissionais.

Ao meu pai Sérgio e minha mãe DoCarmo pela atenção, fé, oração e todo amor que sempre me deram, mesmo sem nenhuma ligação biológica existente.

À maravilhosa família (minha irmã Lílian, tia Doracy e Lului) que me acolheu com todo seu carinho, minha eterna gratidão.

A toda a família Galvão, pelo apoio e incentivo.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	viii
RESUMO	ix
SUMMARY	xi
INTRODUÇÃO	13
REVISÃO DE LITERATURA	15
Disponibilidade de Nutrientes do Esterco	15
Formas de Fósforo no Solo	17
Estimativas da Formas de Fósforo do Solo	19
Referências Bibliográficas	21
CAPÍTULO 1	25
ACUMULAÇÃO DE NUTRIENTES EM SOLOS ARENOSOS ADUBADOS COM ESTERCO BOVINO	25
Resumo	26
Summary	27
Introdução	28
Material e Métodos	30
Resultados e Discussão	33
Conclusões	36
Agradecimentos	36
Referências Bibliográficas	37
CAPÍTULO 2	45
FRAÇÕES DE FÓSFORO EM TRÊS CAMADAS DE SOLOS ARENOSOS ADUBADOS COM ESTERCO POR LONGOS PERÍODOS	45
Resumo	46
Summary	47
Introdução	48
Material e Métodos	50
Resultados e Discussão	53
Conclusões	56
Agradecimentos	56
Referências Bibliográficas	57
CONSIDERAÇÕES FINAIS	66

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1

Nº	Título	Página
	Atributos físicos e químicos de amostras de solo coletadas em três profundidades de áreas sem ou com aplicação de esterco.....	40
	Teor médio, mínimo, máximo, desvio padrão e coeficiente de variação (%) de N, P, K, Ca, Mg, cinzas, celulose, hemicelulose e lignina em amostras de esterco bovino (n=09) coletadas em nove propriedades do município de Esperança/PB.....	41
	Estoque e balanço anual estimado de nutrientes na camada de 0-60 cm em solos adubados ou não com esterco bovino e perdas estimadas acumuladas (30 anos) nas áreas adubadas.....	42

CAPÍTULO 2

Nº	Título	Página
1	Teor médio, mínimo, máximo e desvio padrão de P total e extraível com Mehlich-1, resina, água, H ₂ SO ₄ 1 mol L ⁻¹ e NaOH 0,1 mol L ⁻¹ em amostras de esterco bovino (n=09) coletadas em nove propriedades do município de Esperança/PB.....	63
2	Proporção média das frações de P em amostras de solo agrupadas em quatro faixas pelo teor de P total na camada de 0-20 cm.....	64
3	Estimativas dos contrastes ortogonais para as percentagem de P em cada fração relativa ao P total, na comparação entre duas camadas de solos contíguas.....	65

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Nº	Título	Página
1	Teor médio e erro padrão de P total em amostras de solo agrupadas em quatro faixas pelo teor de P total na camada de 0-20 cm (Faixa 1: ≤ 110 ; Faixa 2: 111-220; Faixa 3: 221-330; Faixa 4: 331-440). Médias seguidas de letras iguais na mesma profundidade não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade....	43
2	Teores médios e erro padrão de P solúvel em água em amostras de solo agrupadas em quatro faixas pelo teor de P total na camada de 0-20 cm (Faixa 1: ≤ 110 ; Faixa 2: 111-220; Faixa 3: 221-330; Faixa 4: 331-440). Médias seguidas de letras iguais na mesma profundidade não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.....	44

CAPÍTULO 2

Nº	Título	Página
1	Relação entre Frações lábeis inorgânicas e P total (A) e entre frações inorgânicas e P total (B), em amostras de solo de três profundidades (n=66) adubadas e não adubadas com esterco.....	60
2	Relação entre o Ca total e o P total (A) e entre P extraível por ácido e Ca total (B), em amostras de solo de três profundidades (n=66) adubadas e não adubadas com esterco.....	61
3	Relação entre as frações orgânicas de P e o P total (A) e entre a fração residual, a soma das frações inorgânicas e a soma das frações orgânicas e o P total (B), em amostras de solo de três profundidades (n=66) adubadas e não adubadas com esterco.....	62

DINÂMICA DE NUTRIENTES EM SOLOS ARENOSOS ADUBADOS COM ESTERCO BOVINO POR LONGOS PERÍODOS

Sandra Regina da Silva Galvão

RESUMO

A utilização de esterco é uma alternativa amplamente adotada para o suprimento de nutrientes, principalmente nitrogênio e fósforo, em áreas de agricultura familiar na região semi-árida e agreste da Paraíba. A aplicação deste insumo em quantidades além das necessidades das culturas, por longos períodos, pode causar acúmulo de nutrientes no solo. Estes se concentram inicialmente na camada superficial, mas, no início do período chuvoso e com cobertura vegetal ainda escassa, podem ser arrastados para camadas mais profundas e eventualmente serem perdidos do perfil, principalmente em solos arenosos. Embora apresentem relevância socioeconômica e ambiental, estudos relacionados com a temática mencionada são praticamente inexistentes na região. Por esse motivo, o objetivo do presente trabalho foi quantificar o acúmulo de nutrientes e a dinâmica do fósforo em solos arenosos adubados com esterco bovino por longos períodos, em 22 áreas de agricultura familiar do município de Esperança, PB. Dentre estas, 18 áreas receberam adição anual de esterco por pelo menos dois anos enquanto quatro delas estavam sob pastagem e não receberam adubação por pelo menos 20 anos. Coletaram-se amostras de solo das camadas de 0-20; 20-40 e 40-60 cm, que foram analisadas quanto à granulometria, densidade do solo, pH, C, N e P totais, bases trocáveis, P extraível por água e por Mehlich-1 e realizado o fracionamento seqüencial do P, utilizando os seguintes extratores: água (P_w), resina (P_{res}), $NaHCO_3$ (P_{bic} e P_{obic}), $NaOH$ (P_{hid} e P_{ohid}), H_2SO_4 ($P_{ácido}$) e, finalmente, digestão com H_2SO_4/H_2O_2 (P_{resd}). Amostras de esterco obtidas em nove das propriedades foram analisadas quanto aos teores totais de N, P, K, Ca e Mg e extrações independentes de P com água, resina, Mehlich-1, H_2SO_4 , $NaOH$ e digestão ácida. A aplicação de esterco resultou em acumulações médias ao redor de 20 $Mg\ ha^{-1}$ de C, 2 $Mg\ ha^{-1}$ de N total e Ca, e de 0,5 a 1 $Mg\ ha^{-1}$ de P total, K e Mg (0-60 cm). Acumulações de P solúvel em água e bases trocáveis na camada de 40-60 cm, em relação às testemunhas, indicaram um grande potencial de perda desses nutrientes por escoamento sub-superficial. A fração $P_{ácido}$, considerado como P ligado ao Ca, foi a que apresentou os maiores acréscimos ($P < 0,01$) como resultado das adições de esterco, aumentando de 8,4 para 43,8

mg kg⁻¹ nas amostras com menor e maior teor de P_t, respectivamente. A soma de P_w, P_{res} e P_{i_{bic}}, formas estas consideradas lábeis, apresentou acréscimos semelhantes à fração P_{ácido}, enquanto que, a fração P_{i_{hid}}, apresentou o menor aumento em função da adição de esterco. As formas de P orgânico também aumentaram, sendo maiores (P < 0,01) os aumentos da fração P_{o_{hid}}, menos lábil, que os da fração P_{o_{bic}}. O fósforo residual foi praticamente metade do P_t, independentemente do teor deste último. Os acréscimos observados nas distintas frações foram justificados pelo elevado teor médio de P_w (36%), de P_{ácido} (34%) e de P_{o_{hid}} (30%) do esterco. Variações significativas nas proporções de P entre as camadas de solo indicaram o movimento descendente do P em formas orgânicas. A relativa constância de uma proporção elevada de P_{resd} (50-60%), independentemente do teor de P_t das amostras, sugere a necessidade de aprimorar o fracionamento do P do solo. Os aumentos nas frações lábeis indicam a necessidade de estudos visando otimizar as doses utilizadas assim como também avaliar o efeito residual dos nutrientes, em especial do P lábil e do P_{ácido}, aportados pelo esterco.

Palavras-chave: Agricultura familiar, adubação orgânica, migração vertical de nutrientes, fracionamento de fósforo, lixiviação de fósforo.

DYNAMICS OF NUTRIENTS IN SANDY SOILS AMENDED WITH CATTLE MANURE FOR LONG PERIODS

Sandra Regina da Silva Galvão

SUMMARY

Additions of farmyard manure (FYM) to the soil are a widely adopted alternative to supply nutrients, particularly nitrogen and phosphorus, in areas of subsistence agriculture in the semi-arid and agreste of Paraíba State. Additions of this residue in quantities that far exceed crop uptake, for long periods, can cause accumulation of nutrients in the soil. These accumulations occur initially on the surface layer, but on the onset of the rainy season, with most of the soil surface without plant cover, it can migrate to deeper layers and possibly be lost from the soil profile, especially in sandy soils. Although relevant from a socioeconomic and environmental perspective, information regarding these issues are almost nonexistent in the region. Therefore, the objective of this study was to quantify the accumulation of nutrients and the dynamics of phosphorus in sandy soils fertilized with FYM for long periods, on 22 areas of subsistence agriculture in the municipality of Esperança/PB. Eighteen of these areas received annual additions of manure for at least two years while four of them were under pasture and had not been fertilized in the recent past. Soils samples from the 0-20, 20-40 and 40-60 cm layers were taken from each field, and analyzed for particle size, bulk density, pH, total C, N and P, exchangeable bases, water and Mehlich-1 extractable P. In addition, P in the samples was sequentially fractionated with water (P_w), resin (P_{res}), NaHCO_3 ($P_{i_{bic}}$ and $P_{o_{bic}}$), NaOH ($P_{i_{hid}}$ and $P_{o_{hid}}$), H_2SO_4 ($P_{\acute{a}cido}$), and the soil residue finally digested with $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}_2$ (P_{resd}). FYM samples used in nine fields were also analyzed for total N, P, K, Ca and Mg, and additionally analyzed for P extractable with water, resin, Mehlich-1, H_2SO_4 , and NaOH (batch extractions). Manure additions resulted in a build up of nutrient stocks, 2 Mg ha^{-1} for N and Ca, and 0,5 to 1 Mg ha^{-1} of P, K and Mg (0-60 cm). Water-soluble P concentrations of 7 mg kg^{-1} in the 40-60 cm layer, indicated losses of this nutrient, eventhough it is considered a nutrient of limited mobility in soils. Thus, accumulation of exchangeable bases in the 0-60 layer, in comparison with control areas, indicated a potential for even greater losses. The P_{acid} fraction, related to Ca-P forms, showed the greatest increases ($P < 0.01$) as a result of FYM additions, raising from 8,4 mg kg^{-1} in non-fertilized samples to 43,8 mg kg^{-1} in samples showing greater P_t contents. The sum of P_w , P_r and $P_{i_{bic}}$, considered as labile P forms, showed

comparable increases with P_{acid} , while P_{hid} showed the smaller increases. Concentrations of organic P forms also increased, more so the fraction considered less labile, P_{ohid} , than the more labile one P_{bic} . The residual P fraction was practically half of P_{t} , independently of changes in total P content. Increases observed in the various fractions were justified by the large average concentrations of P_{w} (36%), P_{acid} (34%), and P_{ohid} (30%) present in the FYM. Significant changes in the proportion of P forms among soil layers indicated the downward movement of organic P forms. The relative constancy of a high proportion of P_{resd} (50-60%), independently of the P_{t} content in the samples, suggests the need to improve the fractionation of soil P. Increases in the labile fractions indicate the need of studies to optimize the rates of FYM additions actually being used, as well as to assess the residual effect of nutrients, and more specifically of the P-labile and P_{acid} fractions added with the FYM.

Keywords: Subsistence agriculture, organic amendments, leaching of nutrients, fractionation of phosphorus, leaching of phosphorus.

INTRODUÇÃO

A produtividade de sistemas de agricultura familiar no agreste da Paraíba depende dos níveis de fertilidade natural dos solos e da ciclagem de nutrientes, que estão associados à mineralização resultante da aplicação de esterco e/ou restos vegetais (Sampaio et al., 1995; Tiessen et al., 1998). O uso de fertilizantes minerais é pouco frequente devido ao baixo poder aquisitivo dos agricultores, à dificuldade de acesso ao crédito agrícola e à elevada variabilidade na precipitação pluviométrica. Por isso é comum o uso de esterco como fonte nutricional para as culturas, principalmente porque os solos dessa região apresentam baixa fertilidade natural. A aplicação contínua de esterco no solo tende a aumentar a quantidade de nutrientes, principalmente nitrogênio e fósforo (Menezes & Salcedo, 2007). O esterco está se tornando um recurso escasso na região e vem se tornando uma fonte de renda para o agricultor, no caso de venda do produto ou como um meio de repor ao solo os nutrientes retirados pelas culturas.

As quantidades aplicadas de esterco são bastante variáveis em função do tipo de cultivo e são realizadas de forma empírica, sem nenhuma base técnica, apenas pelo conhecimento adquirido durante os anos de cultivo dos agricultores. Em áreas utilizadas com culturas de maior rentabilidade, como a batatinha e a erva-doce, as aplicações são anuais e em doses que podem variar entre 12 e 20 Mg ha⁻¹. Doses nesta faixa geralmente disponibilizam nutrientes acima da necessidade das plantas, proporcionando o acúmulo de nutrientes no solo, especialmente P, uma vez que a dose se baseia na necessidade de N da planta e a relação N/P do esterco é menor do que o da planta (Akhtar et al., 2004).

Quando o acúmulo de nutrientes ocorre em solos arenosos, com baixos teores de matéria orgânica e capacidade limitada de retenção de água e íons, o potencial de perdas por lixiviação é elevado. Dados de acumulação e perdas de nutrientes no solo, decorrentes da adubação excessiva de esterco têm sido amplamente relatados em sistemas de produção agrícola de países industrializados (Sharpley et al., 2004; Mitchell & Tu, 2006). Informações desse tipo são praticamente inexistentes em áreas de agricultura familiar, particularmente na região agreste e semi-árida do Nordeste brasileiro. Com isso, novos estudos têm sido feitos para melhor entender o ciclo dos nutrientes em áreas que receberam esterco a longo prazo, com enfoque especial na ciclagem do fósforo (P) (Galvão et al., 2008).

O manejo adequado de fontes fosfatadas, seja ela inorgânica ou orgânica, apresenta um importante papel tanto do ponto de vista agrônomo quanto ambiental. Uma concentração

inadequada de P em solos agricultáveis pode impossibilitar a produção das culturas, enquanto que altas concentrações podem levar a eutroficação das águas superficiais e sub-superficiais.

A extração seqüencial de P (Hedley et al., 1982) tem se tornado uma importante ferramenta no estudo da dinâmica do P no solo e fornece informações relevantes sobre a distribuição do P adicionado por resíduos orgânicos nos compartimentos inorgânicos e orgânicos de P do solo que apresentam diferentes graus de disponibilidade para as plantas.

Diante do exposto, projetou-se a presente pesquisa objetivando estudar a dinâmica do fósforo em solos arenosos adubados com esterco bovino por longos períodos.

O presente trabalho consta de dois artigos preparados para publicação em periódicos científicos. No primeiro artigo, objetivou-se quantificar as concentrações de carbono e nutrientes em amostras de solo nas camadas de 0-20, 20-40 e 40-60 cm de áreas adubadas e não adubadas com esterco bovino; quantificar as concentrações de nutrientes em amostras de esterco bovino e calcular o acúmulo de nutrientes resultantes da adubação com esterco e o potencial de perdas por lixiviação. O segundo artigo buscou entender melhor o acúmulo e/ou perdas das diferentes formas de P do solo, devido a migração de P solúvel nestes solos, através do fracionamento seqüencial químico das amostras de solo das camadas citadas anteriormente adubadas e não adubadas com esterco.

REVISÃO DE LITERATURA

Disponibilidade de Nutrientes do Esterco

A região semi-árida do Nordeste do Brasil é caracterizada pela baixa fertilidade natural dos solos e predominância de minifundiários com mão-de-obra familiar, cultivos agrícolas de subsistência e pecuária baseada no pastoreio da vegetação nativa (Menezes & Oliveira, 2008). O uso de fertilizantes inorgânicos é pouco freqüente devido ao limitado poder aquisitivo dos produtores de baixa renda, à dificuldade de acesso ao crédito agrícola e à elevada variabilidade na precipitação pluviométrica. Em culturas de maior rentabilidade, como a batatinha, é freqüente o uso de fertilizante nitrogenado comercial. Por estes motivos, a utilização de esterco é uma alternativa amplamente adotada para o suprimento de nutrientes, principalmente nitrogênio e fósforo, nos solos da região.

No entanto, a reduzida disponibilidade de esterco nas propriedades faz com que os agricultores, principalmente àqueles que produzem batatinha para comercialização, necessite comprar esterco de regiões circunvizinhas, o que eleva os custos de produção (Menezes et al., 2002). No caso daqueles que produzem apenas para consumo familiar, a aplicação é feita com esterco produzido na própria propriedade. A aplicação de esterco na maioria das propriedades que utilizam desta fonte para manter a fertilidade do solo é anual. Não há um acompanhamento da relação entre as doses aplicadas e a retirada de nutrientes pelas culturas, e isto pode resultar em doses menores ou maiores que as necessárias. Este último caso foi observado por Silva et al. (2007) que estudaram o efeito da aplicação de esterco e/ou crotalária em um Neossolo Regolítico e constatou que a aplicação anual de 15 t ha⁻¹ de esterco levou a um aumento significativo nas concentrações de N total e de P total e nas de P e K disponíveis no solo, ao longo de cinco anos de cultivo da batata em experimento de campo.

Quando há a adição de resíduos orgânicos ao solo, a decomposição promovida pela biomassa microbiana do solo faz com que ocorra mineralização do P_o e o acúmulo do fósforo se dê preferencialmente nas formas inorgânicas. Por outro lado, se o resíduo for de difícil decomposição, o fósforo pode permanecer em formas orgânicas (Otabbong et al. 1997). Quando o resíduo adicionado é esterco, o acúmulo do fósforo também é mais pronunciado nas formas inorgânicas (Tran & N'dayegamiye, 1995; Rubaek & Sibbesen, 1995; Sui et al., 1999), e isto seja devido ao fato de que mais de 60% do fósforo contido nos esterco se encontra em formas inorgânicas antes mesmo de sua aplicação (Sui et al., 1999; Cassol et al., 2001).

Muitos estudos de regiões temperadas têm mostrado que aplicações contínuas de esterco a taxas acima da requerida pelas plantas, causam contaminação dos lençóis freáticos, devido a lixiviação de nutrientes, principalmente N e P (Sharpley et al., 1997; Siddique & Robinson, 2004; Sharpley et al., 2004; Mitchell & Tu, 2006). A aplicação de esterco por um período de 10 anos causou aumentos significativos no pH e nos teores de C, Ca, Mg, P, K, NH_4^+ e NO_3^- . Esses aumentos resultaram na acumulação na camada superficial e na lixiviação destes nutrientes (Mitchell & Tu, 2006). Sharpley et al. (2004) constataram que a aplicação de esterco por um longo período resultou na acumulação de grandes quantias de P, com o aumento da fração inorgânica, que era de 26 a 57% do P total em solos que não receberam aplicação e passou para 49 a 80% do P total em solos adubados com esterco.

Estudos recentes têm constatado a acumulação de nutrientes e as perdas por lixiviação em solos arenosos adubados com esterco por um período maior de dois anos da região semi-árida do NE do Brasil (Galvão et al., 2008; Menezes & Oliveira, 2008). Tanto os aumentos quanto as perdas são mais intensas para o P, que junto com o N podem causar a contaminação dos lençóis freáticos levando a eutroficação de rios e lagos. Casos relacionados à eutroficação já são relatados nos países desenvolvidos, devido à uma intensa atividade agrícola e pecuária, levando ao uso constante e excessivo de esterco no solo. Aplicações de esterco de curral curtido resultaram em maiores valores de fósforo extraídos por Mehlich-1, resina e Bray-1, em relação a áreas não adubadas (Azevedo et al., 2004). Isso acontece porque adições de matéria orgânica ao solo, na forma de esterco animal, causam uma diminuição da adsorção de P e aumentam a disponibilidade deste nutriente para as plantas (Sanyal e De Data, 1991). Tal fato pode ser atribuído ao poder do solo em adsorver ácidos orgânicos, que irão ocupar os sítios de adsorção de P, principalmente nas superfícies dos óxidos de Fe e Al. Os ácidos orgânicos apresentam grupos funcionais COOH e as ligações entre esses grupos funcionais e as hidroxilas da superfície dos óxidos de Fe e Al bloqueiam esses sítios de adsorção de P (Hue, 1991; Fontes et al. 1992). Dessa forma, quanto maior o número desses grupos funcionais nos compostos, maior será sua efetividade na competição pelos sítios de adsorção (Novais & Smyth, 1999). Na prática, um aumento do teor de ácidos orgânicos, seja pela aplicação de resíduos orgânicos, seja pela exsudação de raízes e metabolismo de microorganismos, poderá proporcionar maior teor de P disponível às plantas. Portanto, devem preconizar-se opções de manejo para aumentar o teor de matéria orgânica do solo e, conseqüentemente, a disponibilidade de P para as plantas (Silva & Raij., 1999; Abekoe e Sahrawat, 2001). Esta medida nem sempre é benéfica ao sistema, uma vez que teores elevados

de P na solução do solo encontram-se susceptíveis à migração vertical na ocorrência de chuvas ou mesmo pela irrigação.

Formas de Fósforo no Solo

O fósforo do solo deriva dos minerais apatíticos contidos no material de origem. O fósforo é o 12º elemento mais abundante na crosta terrestre e o 2º elemento que mais limita a produtividade nos solos tropicais e é considerado o 1º elemento mais limitante na região semi-árida do NE do Brasil (Novais & Smith, 1999; Salcedo, 2006). Esse comportamento é consequência de sua habilidade em formar compostos de alta energia de ligação com os óxidos, conferindo-lhe alta estabilidade na fase sólida.

A atuação dos fatores e os processos de formação do solo sobre o material de origem alteram os minerais primários, produzindo novos compostos, cuja natureza depende do grau e da intensidade da intemperização (Anjos et al., 1999). Durante o processo de intemperização o fósforo é liberado para a solução do solo e readsorvido aos colóides ou absorvido pelos organismos e pelas plantas (Frossard et al., 1995). É no início de formação do solo que ocorre a maior disponibilidade de fósforo, já que os colóides inorgânicos são pouco intemperizados e a quantidade de sítios de adsorção é pequena; por isso, ele é retido com baixa energia, facilitando seu retorno à solução do solo (Rheinheimer et al., 1999). Parte do P da solução do solo é também imobilizado pelos organismos vivos. Após a morte destes, parte desse P imobilizado permanece no solo na forma de compostos orgânicos e parte é mineralizado (Moreira & Siqueira, 2002). Com o avanço do intemperismo, os minerais do solo diminuem o tamanho de seus cristais e há também a formação de oxi-hidróxidos de Fe e Al aumentando os sítios de adsorção aniônica. Lentamente começa a diminuir a concentração de P associado aos minerais apatíticos e começa a formação de fosfatos secundários de Fe e Al, no caso de solos ácidos. Com isso, a fase sólida mineral do solo muda seu caráter frente à disponibilidade de fósforo, passando de fonte a dreno da solução, devido à formação de complexos de alta energia de difícil reversibilidade, o que diminui a disponibilidade do nutriente. Em solos desenvolvidos, a mineralização do fósforo orgânico passa a ser a fonte principal de tamponamento do fósforo, já que os óxidos atuam principalmente como dreno e competem com as plantas pelo fósforo (Smeck, 1985; Sharpley et al., 1987; Frossard et al., 1995; Novais & Smyth, 1999).

A forma do P disponível às plantas em solução é o ânion ortofosfato, mono ou di-ácido (Novais & Smyth, 1999). Este elemento encontra-se distribuído em formas orgânicas (Po) e

inorgânicas (Pi) com diferentes graus de labilidade, dependendo do grau e da intensidade de intemperização. A proporção de PO₄ em compostos orgânicos (fosfato de inositol, fosfolipídeos, nucleotídeos, etc.) varia de 20 a 80% do P total do solo (Frossard et al., 1995) e está associado a células microbianas, resíduos vegetais e compostos húmicos. O fósforo que é liberado pelas células microbianas através da mineralização torna-se disponível para as plantas mais rapidamente que aquele presente nos resíduos vegetais e compostos húmicos (Moreira & Siqueira, 2002).

Grande parte dos estudos do fósforo no solo concentra-se na fração inorgânica (Novais & Smith, 1999); contudo, a fração orgânica de P constitui uma porção significativa do P total, variando de 30 a 65% na maioria dos solos (Sims & Pierzynski, 2005), que pode contribuir substancialmente para a disponibilidade de P para as plantas por meio do processo de mineralização. Os sistemas de manejo do solo modificam a dinâmica do P, e alterações dos conteúdos das diferentes formas de P_o têm sido observadas em decorrência de práticas agrícolas (Matos et al., 2006).

Nas formas inorgânicas, o P encontra-se associado ao ferro, alumínio e cálcio, na forma de precipitados, e/ou adsorvido nos óxidos hidratados de Fe e Al. Estas formas podem ser divididas em categorias: lábil, moderadamente lábil, não-lábil e residual, de acordo com a energia com que são adsorvidas aos minerais do solo ou a estabilidade dos fosfatos formados (Rheinheimer et al., 1999). A forma lábil é a soma do P em solução mais àquele P da fase sólida que repõe o P em solução e que se encontra disponível às plantas e microorganismos (Gonçalves et al., 1989); a moderadamente lábil corresponde à fração do fósforo que se encontra fortemente adsorvida a oxi-hidróxidos de Fe e Al com diferentes graus de cristalização; a fração não-lábil é a que se encontra ligada à apatita e outros fosfatos de Fe, Al e Ca menos reativos, e a residual compreende o fosfato mais recalcitrante (Tiessen et al., 1984). Estas categorias também podem ser usadas para as formas orgânicas de P no solo, de acordo com o grau de estabilidade dos compostos orgânicos. Esta fração é representada pela diferença entre o fósforo total do solo e as formas antes indicadas.

Os principais componentes orgânicos de P no solo são: ortofosfato monoésteres (fosfato de inositol, desde mono até hexafosfato de inositol), ortofosfato diésteres (ácidos nucleicos, fosfolipídios e ácido teicóico), polifosfatos (ATP) e fosfonatos (Novais & Smith, 1999). O fosfato de inositol aparece em maior quantidade, variando entre 2 e 60% do fósforo orgânico do solo (Koopman et al., 2007). A estabilidade destes compostos é dependente de sua constituição e de sua interação com a fração mineral, pois são usados como fonte de

carbono e elétrons pelos microrganismos, resultando na sua mineralização e disponibilização do fósforo. Alguns compostos como ácidos nucleicos e fosfolipídios, com ligação diéster, possuem estrutura química que facilita sua decomposição, sendo facilmente mineralizáveis e, por isso, as quantidades armazenadas no solo serem pequenas. Já os fosfatos monoésteres, como o fosfato de inositol, apresentam alta energia de ligação com a estrutura química da molécula e alta carga residual, o que lhe confere facilidade de interação com os constituintes inorgânicos do solo. Isso dificulta a mineralização e favorece o acúmulo no solo, sendo de baixa labilidade e disponibilidade às plantas (Novais & Smith, 1999). A maior parte do fósforo orgânico do solo é encontrada na forma de fosfatos de inositol, seguido dos fosfolipídios e ácidos nucleicos (Hansen et al., 2004). Koopmans et al. (2007) observaram que o ortofosfato foi a forma dominante em solos (0-5 cm) adubados com esterco e que este constituiu entre 68 e 76% do P total extraído com NaOH-EDTA.

O fósforo se redistribui no ambiente pela ação antrópica, sendo retirado das jazidas, onde está concentrado, e depositado, via fertilizante, ou através da aplicação de produtos orgânicos nos ambientes agrícolas. A erosão também contribui para a redistribuição de P no ambiente. Quando bem manejados, os solos agrícolas permitem a estabilidade do elemento, sendo as saídas decorrentes principalmente da exportação dos produtos. Quando mal manejados, seja por aplicações excessivas ou por processos erosivos intensos, o P é transferido para os ambientes aquáticos, onde pode causar danos ambientais severos (Medeiros & Salcedo, 1995). Como as reservas mundiais de fósforo são finitas, a utilização do nutriente deve obedecer a uma filosofia de maximização da sua eficiência, com adições mínimas e redução das perdas. Para isto, o monitoramento do "status" do fósforo no solo é fundamental para o manejo adequado da adubação fosfatada.

Estimativas das Formas de Fósforo do Solo

A disponibilidade de fósforo para a planta tem sido avaliada por numerosas técnicas, que quantificam o P da solução e uma parte do P da fase sólida do solo (Tiessen et al., 1991). A técnica mais freqüente utiliza diversos tipos de soluções (ácidas, básicas ou salinas) para extrair quantidades variáveis de P, que se correlacionam com aquelas absorvidas pelas plantas durante seu ciclo anual de crescimento (Sharpley et al., 1987). Os principais extratores para P disponível são: Mehlich-1, Mehlich-2, Mehlich-3, Bray-1, Bray-2, Olsen e resina de troca aniônica (RTA). Esta última é um polímero sintético, eletropositivamente carregado, portanto

com capacidade de adsorver o ânion fosfato (Novais & Smith, 1999). O extrator Mehlich-1 que consiste de uma mistura bi-ácida ($\text{HCl } 0,05 \text{ mol L}^{-1} + \text{H}_2\text{SO}_4 \text{ } 0,0125 \text{ mol L}^{-1}$) é de uso mais generalizado no Brasil, com exceção do estado de São Paulo (Tomé Jr, 1997). Os extratores químicos utilizados para quantificar o fósforo disponível dos solos atuam sobre a forma lábil; porém, as frações orgânicas que também contribuem para a nutrição das plantas, não são quantificadas por estes extratores (Rheinheimer et al., 1999). A avaliação da disponibilidade de P no solo por meio de extratores químicos tem várias limitações (Gjorup et al., 1993). A determinação do P disponível em dado momento é uma medida estática e pode não refletir a real capacidade do solo de suprir as plantas. Isto vale tanto para áreas que nunca receberam fertilização quanto para aquelas que já foram fertilizadas (Araújo et al., 2004). Por este motivo Hedley et al. (1982) desenvolveram um método de extração sequencial de fósforo do solo, que fraciona o elemento em vários reservatórios orgânicos e inorgânicos. Em ambos reservatórios se diferenciam formas lábeis e não-lábeis, com diferentes graus de disponibilidade para as plantas (Silveira et al., 2006). As formas mais lábeis são extraídas por resina e bicarbonato de sódio; em seguida, vêm as extraídas por hidróxido de sódio, que são moderadamente lábeis, incluindo P associado a óxidos de Al e Fe; depois, e extraída por ácido a fração ligada à apatita e outros fosfatos de Ca menos reativos; finalmente o P determinado por uma digestão peróxido/sulfúrica representa o fosfato mais recalcitrante que não pode ser extraído nas frações anteriores (Hedley et al., 1982; Tiessen et al., 1984; Araújo et al., 1993). As frações de P consideradas mais disponíveis têm apresentado para solos, em geral, boas correlações com o P absorvido pelas plantas. 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 (Araújo et al., 1993; Araújo et al., 2004). Este fracionamento tem sido uma excelente ferramenta para estudar a dinâmica de fósforo no solo. Gatiboni (2003) obteve correlações semelhantes entre os teores de fósforo absorvido pelas plantas e a disponibilidade no solo estimada por $\text{NaOH } 0,1 \text{ mol L}^{-1}$ e as obtidas para os métodos Mehlich 1, Mehlich 3 e RTA. Em estudo realizado com um podzólico amarelo cultivado com cana-de-açúcar (Araújo et al. 1993) e em amostras de solo sob plantio direto (Tokura et al. 2002) a fração inorgânica extraível por hidróxido foi maior que as outras frações inorgânicas. Essa tendência dos solos a apresentarem maiores concentrações de P_{hid} é desvantajosa, do ponto de vista da eficiência de uso de fertilizantes, uma vez que esta fração mostra-se relativamente menos disponível do que P resina ou P_{bic} .

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKHTAR, M.; McCALLISTER, D. L.; FRANCIS, D. D.; SCHEPERS, J. S. Manure source effects on soil phosphorus fractions and their distribution. *Soil Sci.*, 170:183-190, 2004.
- ANJOS, L. H. C.; PEREIRA, M. G.; RAMOS, D. P. Matéria orgânica e pedogênese. In: SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O. (Eds.) Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e sub-tropicais. Gênese. Porto Alegre, 1999. p.91-116.
- ARAÚJO, M.S.B.; SALCEDO, I.H. & SAMPAIO, E.V.S.B. Efeito de fertilizações fosfatadas anuais em solo cultivado com cana-de-açúcar. I. Intensidade e formas de acumulação. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 17:389-396, 1993
- ARAÚJO, M.S.B.; SCHAEFER, C. E. G. R. & SAMPAIO, E.V.S.B. Frações de fósforo após extrações sucessivas com resina e incubação, em latossolos e luvisolos do semi-árido de Pernambuco. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 28:259-268, 2004.
- CASSOL, P. C.; GIANELLO, C.; COSTA, V. E. U. Frações de fósforo em estrumes e sua eficiência como adubo fosfatado. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 25: 635-644, 2001.
- FONTES, M. R.; WEED, S. B.; BOWEN, L. H. Association of micro-crystalline goethite and humic acid in some oxisols from Brazil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56:982-990, 1992.
- FROSSARD, E.; BROSSARD, M.; HEDLEY, M. J.; METHERELL, A. Reactions controlling the cycling of P in soils. In: Tiessen, H., ed. Phosphorus in the global environment: transfers, cycles and management. Saskatoon, Canada. p. 107-138. 1995.
- GALVÃO, S. R. S.; SALCEDO, I. H.; OLIVEIRA, F. F. Acumulação de nutrientes em solos arenosos adubados com esterco bovino. *Pesq. Agropec. Bras.*, 43:99-105, 2008.
- GATIBONI, L. C. Disponibilidade de formas de fósforo do solo às plantas. PPGA/UFSM. Santa Maria-RS. 231p. 2003. (Tese de Doutorado).
- GJORUP, G. B.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; NEVES, J. C. L. Avaliação do método do papel aniônico como extrator de fósforo disponível do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 17: 417-422, 1993.
- GONÇALVES, J. L. M.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; NEVES, J. C. L.; RIBEIRO, A. C. Cinética de transformação de fósforo lábil e não-lábil, em solos de Cerrado. *R. Bras. Ci. Solo*, 13:13-24, 1989.
- GUERRA, J. G. M.; ALMEIDA, D. L.; SANTOS, G. A.; FERNANDES, M. S. Conteúdo de fósforo orgânico em amostras de solos. *Pesq. Agropec. Bras.*, 31:291-299, 1996.

KOOPMANS, G. F.; CHARDON, W. J.; McDOWELL, R. W. Phosphorus movement and speciation in a sandy soil profile after long-term animal manure applications. *J. Environ. Qual.*, 36:305-315, 2007.

HANSEN, J. C.; CADE-MENUN, J.; STRAWN, D. G. Phosphorus speciation in manure-amended alkaline soils. *J. Environ. Qual.*, 33: 1521-1527, 2004.

HEDLEY, M. J.; STEWART, J. W. B.; CHAUHAN, B. S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. *Soil Sci. Am. J.*, 46: 970-976, 1982.

HUE, N.V. Effects of organic acids/anions on P sorption and phytoavailability in soils with different mineralogies. *Soil Science*, 152: 463-471, 1991.

MATOS, E. S.; MENDONÇA, E. S.; VILLANI, E. M. A.; LEITE, L. F. C.; GALVÃO, J. C. C. Formas de fósforo no solo em sistemas de milho exclusivo e consorciado com feijão sob adubação orgânica e mineral. *R. Bras. Ci. Solo*, 30: 625-632, 2006.

MEDEIROS, C. & SALCEDO, I. H. Phosphorus transfer from tropical terrestrial to aquatic systems – mangroves. In: Tiessen, H., ed. *Phosphorus in the global environment: transfers, cycles and management*. Saskatoon, Canada. p. 107-138, 1995.

MENEZES, R.S.C.; SALCEDO, I.H.; ELLIOTT, E.T. Microclimate and nutrient dynamics in a silvopastoral system of semiarid northeastern Brazil. *Agroforestry Systems*, 56:27-38, 2002.

MENEZES, R. S. C. & SALCEDO, I. H. Mineralização de N após incorporação de adubos orgânicos em um Neossolo Regolítico cultivado com milho. *Rev. Bras. Eng. Agric. Amb.*, 11:361-367, 2007.

MENEZES, R. S. C. & OLIVEIRA, T. S. Mudanças na fertilidade de um neossolo regolítico após seis anos de adubação orgânica. *Rev. Bras. Eng. Agric. Amb.*, 12:251-257, 2008.

MITCHELL, C. C. & TU, SHUXIN. Nutrient accumulation and movement from poultry litter. *Soil Sci. Am. J.*, 70: 2146-2153, 2006.

MOREIRA, F. M. S. & SIQUEIRA, J. O. *Microbiologia e bioquímica do solo*. Lavras: UFLA. 2002. 626p.

NOVAIS, R. F. & SMITH, T. J. *Fósforo em solo e planta em condições tropicais*. Viçosa: UFV-DPS. 1999. 399p.

OTABBONG, E.; PERSSON, J.; IAKIMENKO, O., SADOVNIKOVA, L. The ultuna long-term soil organic matter experiment. *Plant and Soil*, Dordrecht, 195: 17-93, 1997.

RHEINHEIMER, D.; CASSOL, P. C.; KAMINSKI, J.; ANGHINONI, I. Fósforo orgânico do solo. In: SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O. (Eds.) Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e sub-tropicais. Gênese. Porto Alegre, 1999. p.139-157.

RUBAEK, G. H.; SIBBESEN, E. Soil phosphorus dynamics in a long-term field experiment at Askow. Biol. Fert. Soils, 20: 86-92, 1995.

SALCEDO, I. H. Biogeoquímica do fósforo em solos da região semi-árida do NE do Brasil. R. Geo., 23:108-123, 2006.

SAMPAIO, E. V. S. B.; SALCEDO, I. H.; SILVA, V. M.; ALVES, G. D. Capacidade de suprimento de nitrogênio e resposta à fertilização de vinte solos de Pernambuco. R. Bras. Ci. Solo. Campinas, 19: 269-279, 1995.

SANYAL, S.K. & DATTA, S.K. Chemistry of phosphorus transformations in soil. Advances in Soil Science, 16:1-120, 1991.

SHARPLEY, A. N.; TIESSEN, H.; COLE, C. V. Soil phosphorus forms extracted by soil tests as a function of pedogenesis. Soil Sci. Soc. Am. J., 51:362-365, 1987.

SHARPLEY, A. N.; SMITH, S. J.; BAIN, R. Effect of poultry litter application on the nitrogen and phosphorus content of Oklahoma soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 57:1131-1137, 1997.

SHARPLEY, A. N.; McDOWELL, R. W.; KLEINMAN, P. J. A. Amounts, forms, and solubility of phosphorus in soils receiving manure. Soil Sci. Soc. Am. J., 68:2048-2057, 2004.

SIDDIQUE, M. T. & ROBINSON J. S. Differences in phosphorus retention and release in soils amended with animal manures and sewage sludge. Soil Sci. Soc. Am. J., 68:1421-1428, 2004.

SILVA, F.C. & RAIJ, B. VAN. Disponibilidade de fósforo em solos avaliada por diferentes extratores. Pesq. Agropec. Bras., 34:267-288, 1999.

SILVA, T. O.; MENEZES, R. S. C.; TIESSEN, H.; SAMPAIO, E. V. S. B.; SALCEDO, I. H.; SILVEIRA, L. M. Adubação orgânica da batata com esterco e/ou *Crotalaria juncea*. I - Produtividade vegetal e estoque de nutrientes no solo em longo prazo. R. Bras. Ci. Solo, 31:39-49, 2007.

SILVEIRA, M. M. L.; ARAÚJO, M. S. B.; SAMPAIO, E. V. S. B. Distribuição de fósforo em diferentes ordens de solo do semi-árido da Paraíba e de Pernambuco. R. Bras. Ci. Solo, 30:281-291, 2006.

- SIMS, J. T. & PIERZYNSKI, G. M. Chemistry of phosphorus in soil. In: TABATABAI, M.A. & SPARKS, D.L. (Eds.). Chemical Processes in Soils. SSSA Book Series 8. Soil Science Society of America, Inc. Madison. 2005, p.151-192.
- SMECK, N, E. Phosphorus dynamics in soils and landscapes. *Geoderma*, 36: 185-199, 1985.
- SUI, Y.; THOMPSON, M. L.; SHANG, C. Fractionation of phosphorus in a mollisol amended with biosolids. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63: 1174-1180, 1999.
- TIESSEN, H.; STEWART, J. W. B. & COLE, C. V. Pathways of phosphorus transformations in soils of differing pedogenesis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48:853-858. 1984.
- TIESSEN, H.; FROSSARD, E.; MERMUT, A. R.; NYAMEKYE, A. L. Phosphorus sorption and properties of ferruginous nodules from semiarid soils from Ghana and Brasil. *Geoderma*, 48:373-389, 1991
- TIESSEN, H; CUEVAS, E.; SALCEDO, I.H. Organic matter stability and nutrient availability under temperate and tropical conditions. *Adv. GeoEcology*, 31:415-422. 1998.
- TRAN, T. S.; N'DAYEGAMIYE, A. Long-term effects of fertilizers and manure application on the forms and availability of soil phosphorus. *Can. J. Soil Sci.*, 75: 281-285, 1995.
- TOMÉ Jr., J. B. Manual para interpretação de análise de solo. Guaíba: Agropecuária. 1997. 247p.

CAPÍTULO 1

ACUMULAÇÃO DE NUTRIENTES EM SOLOS ARENOSOS ADUBADOS COM ESTERCO BOVINO

Sandra Regina da Silva Galvão, Ignacio Hernan Salcedo e Fabio Freire de Oliveira

Trabalho publicado na **Revista Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.43, 99-105p, 2008

ACUMULAÇÃO DE NUTRIENTES EM SOLOS ARENOSOS ADUBADOS COM ESTERCO BOVINO

Sandra Regina da Silva Galvão⁽²⁾, Ignacio Hernan Salcedo⁽³⁾ e Fabio Freire de Oliveira⁽⁴⁾

RESUMO

Os objetivos do presente trabalho foram quantificar as concentrações de carbono e nutrientes minerais em solos de áreas adubadas e não adubadas com esterco; quantificar as concentrações de nutrientes em amostras de esterco bovino utilizado na região e calcular o acúmulo de nutrientes resultantes dessa adubação e o potencial de perdas por lixiviação. Foram amostradas 18 áreas agrícolas, com adição anual de esterco por pelo menos dois anos consecutivos e, como controle, quatro áreas sob pastagem não adubadas, coletando-se amostras de solo das camadas de 0-20; 20-40 e 40-60 cm, que foram analisadas quanto à granulometria, densidade do solo, pH, C, N e P totais, bases trocáveis, P extraível por água e por Mehlich-1. Amostras de esterco utilizadas em nove áreas também foram analisadas. A aplicação de esterco resultou em acumulações médias ao redor 20 Mg ha⁻¹ de C, 2 Mg ha⁻¹ de N total e Ca, e de 0,5 a 1 Mg ha⁻¹ de P total, K e Mg (0-60 cm). Acumulações de P solúvel em água e bases trocáveis na camada de 40-60 cm, em relação às testemunhas, indicam um grande potencial de perda desses nutrientes.

Termos para indexação: agricultura familiar, adubação orgânica, lixiviação de fósforo.

⁽¹⁾ Parte do trabalho de Tese de Doutorado do primeiro autor, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). 26

⁽²⁾ Doutoranda em Tecnologias Energéticas e Nucleares, Grupo de Fertilidade de Solos/Radioagronomia, Departamento de Energia Nuclear (DEN), Universidade Federal de Pernambuco UFPE, Av. Prof. Luiz Freire, 1000, Cep.:50740-540, Recife (PE). Bolsista CNPq. E-mail: reginassg@uol.com.br

⁽³⁾ Professor Titular do Departamento de Energia Nuclear, UFPE. E-mail: salcedo@ufpe.br

⁽⁴⁾ Doutorando em Tecnologias Energéticas e Nucleares, Departamento de Energia Nuclear-UFPE. Bolsista CNPq. E-mail:oliveiraff@yahoo.com.br

NUTRIENT BUILD UP IN SANDY SOILS RECEIVING MANURE ADDITIONS

Sandra Regina da Silva Galvão, Ignacio Hernan Salcedo e Fabio Freire de Oliveira

SUMMARY

Subsistence agriculture in the northeastern region of Brazil normally relies on manure additions for crop production, but with no control over the rates that are used. In this work, 18 cropped fields that had received annual additions of manure for at least two years and four fields under pasture with no history of manure addition were sampled to assess if this practice result in the accumulation or losses of added nutrients. Soils samples from the 0-20, 20-40 and 40-60 cm layers were taken from each field, and analyzed with regard to their physical (particle size and soil density) and chemical (pH, total C, N and P, extractable P by Mehlich-1 and water, and exchangeable basis) properties. Manure samples used in nine fields were also analyzed for chemical composition. Manure additions resulted in a build up of nutrient stocks, 2 Mg ha⁻¹ for N and Ca, and 0,5 to 1 Mg ha⁻¹ of P, K and Mg (0-60 cm). Water-soluble P concentrations of 7 mg kg⁻¹ in the 40-60 cm layer, indicated losses of this nutrient, being the less mobile in soils. Thus, accumulation of exchangeable bases in the 0-60 layer, in comparison with control areas, indicates a potential for even greater losses.

Index terms: subsistence agriculture, organic amendments, phosphorus lixiviation, organic phosphorus, cattle manure.

INTRODUÇÃO

A utilização de esterco é uma alternativa amplamente adotada para o suprimento de nutrientes, principalmente nitrogênio e fósforo, em áreas de agricultura familiar (roçados) na região semi-árida e agreste do Nordeste do Brasil (Menezes & Salcedo, 2007). Em geral, os solos dessas regiões são deficientes em N e P e, por consequência, a produtividade, sem adubação, é muito limitada. O uso de fertilizantes minerais é pouco freqüente devido ao limitado poder aquisitivo dos produtores de baixa renda, à dificuldade de acesso ao crédito agrícola e à elevada variabilidade na precipitação pluviométrica. Em culturas de maior rentabilidade, como a batatinha, é freqüente o uso de fertilizante nitrogenado comercial. Mais recentemente, tentou-se combinar a aplicação de esterco com a adubação verde (Silva et al., 2007), mas esta forma de manejo não tem sido ainda amplamente adotada pelos agricultores.

As quantidades de esterco aplicadas são bastante variáveis em função do tipo de cultivo. No caso de áreas utilizadas com culturas mercantis, como batatinha (*Solanum tuberosum* L.) e erva doce (*Pimpinella anisum* L.), as aplicações são anuais e em doses que podem variar entre 12 e 20 Mg ha⁻¹. As áreas com cultivos de subsistência, com milho (*Zea mays* L.), feijão mulatinho (*Phaseolus vulgaris* L.), caupí (*Vigna unguiculata* L.), fava (*Vicia faba* L.) e mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) podem receber aplicações anuais, ou em anos alternados, de doses que oscilam entre 4 e 12 Mg ha⁻¹ (Sabourin et al., 2000). O aporte anual de N e P em áreas com culturas mercantis pode ser elevado; uma dose média de esterco de 16 Mg ha⁻¹ (15 % umidade) com teores de N e P de 9 e 3 g kg⁻¹ de matéria seca (MS), por exemplo, aportaria 116 e 40 kg ha⁻¹ desses nutrientes, respectivamente, para uma retirada de aproximadamente 54 e 3 kg ha⁻¹ de N e P, pela batatinha (Silva et al., 2007), com base na produtividade média de 6 Mg ha⁻¹. Com isto, haveria um excesso anual de 62 e 37 kg ha⁻¹ de N e P, respectivamente.

Observa-se, portanto, que aplicações contínuas nessas doses provavelmente estariam propiciando acúmulo de nutrientes no solo (Silva et al., 2007) e muito possivelmente sua migração vertical. Dados de perda de nutrientes por lixiviação são inexistentes para a região, mas têm sido reportados em países com adições freqüentes de esterco (Sharpley et al, 2004). É possível que estas perdas aconteçam também na região do agreste devido a muitos dos solos que recebem esterco serem de textura arenosa (Galvão et al., 2005). A maioria dos agricultores produz esterco em sua propriedade, entretanto, a quantidade produzida não é suficiente para ser aplicada na área a ser cultivada, o que os leva a comprar em cidades vizinhas, o que seria mais um motivo para racionalizar o uso deste insumo.

Por esses motivos, considerou-se necessário realizar um diagnóstico da intensidade de acumulação de nutrientes em áreas de solos arenosos com cultivos mercantis e de subsistência na região do agreste da Paraíba, normalmente adubadas com esterco. Os objetivos do presente trabalho foram quantificar as concentrações de carbono e nutrientes nas camadas de 0-20, 20-40 e 40-60 cm de áreas adubadas e não adubadas com esterco; quantificar as concentrações de nutrientes em amostras de esterco bovino utilizado na região e calcular o acúmulo de nutrientes resultantes dessa adubação e o potencial de perdas por lixiviação.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram escolhidas 22 propriedades de agricultura familiar, representativas do município de Esperança, no Agreste da Paraíba. Nestas propriedades há pequenas áreas cultivadas com batatinha (*Solanum tuberosum* L.) e erva-doce (*Pimpinella anisum* L.) consorciadas, considerados cultivos mercantis da região, além de roçados tradicionais de milho, feijão mulatinho, feijão de corda, mandioca e fava (Sabourin et al., 2000). O solo dominante nas áreas amostradas é o Neossolo Regolítico eutrófico (Embrapa, 1999), de textura arenosa a arenosa-franca, relevo ondulado a suave-ondulado. Nos anos de 2004-2006, a precipitação pluviométrica totalizou 1.121, 741 e 477 mm ano⁻¹, respectivamente, com sete meses ou mais de balanço hídrico negativo.

Pelos históricos levantados junto aos produtores, das 22 áreas amostradas, 18 eram adubadas com esterco, enquanto quatro, com pastagens, não haviam sido adubadas. Das áreas adubadas, 14 vinham sendo adubadas entre 15 e 40 anos e quatro durante menos de seis anos. As quantidades anuais de esterco curtido (15% umidade) aplicadas variavam entre 12 e 20 Mg ha⁻¹ (dose média de 16 Mg ha⁻¹), sendo que um agricultor aplicou 28 t ha⁻¹ nos últimos dois anos.

Na maioria dos casos, o esterco foi comprado de fontes externas. Nas áreas de cultivo de batatinha, 13 dos 18 agricultores aplicaram fertilizantes comerciais nitrogenados (uréia e sulfato de amônio) em doses variando entre 32 e 67 kg ha⁻¹ de N (dose média de 55 kg ha⁻¹). A adubação orgânica e mineral é realizada no plantio da batatinha, mas esta cultura é normalmente precedida por um cultivo de feijão, dependendo da época de início das chuvas. Em anos de boa disponibilidade hídrica, pode haver um plantio de caupi (*Vigna unguiculata*) após a colheita da batatinha, mas dificilmente alcança o estágio de formação de grão e é utilizado como forragem.

Os agricultores não possuem registros precisos de médio ou longo prazo relacionados com o manejo, doses de esterco aplicadas ou com a seqüência das culturas. Os cultivos implementados variam de ano para ano, em função da disponibilidade de sementes, dos preços agrícolas e da percepção quanto à precipitação pluviométrica; da mesma forma, as doses dos insumos utilizados (esterco e, ou adubo mineral), também variam em função da disponibilidade financeira do agricultor e do preço desses insumos. Por esses motivos não se apresentam dados de históricos individuais, baseando a análise em valores médios das áreas amostradas.

Nas áreas cultivadas com o consórcio batatinha/erva-doce (normalmente 5 leirões de batatinha para cada leirão de erva-doce), foram obtidas dez amostras simples de solo das camadas de 0-20, 20-40, e 40-60 cm, em leirões de batatinha. Cada leirão escolhido para coleta das amostras simples de solo eram separados por quatro leirões de batatinha e um de erva-doce. As amostras simples foram coletadas em dez leirões num transecto em cada propriedade estudada. Nas áreas testemunha, a coleta foi realizada de forma semelhante, dez amostras simples de solo nas três camadas seguindo um transecto.

As amostras simples de solo coletadas nas 22 propriedades em estudo foram secas ao ar e passadas por peneira de 2 mm; massas iguais de solo de cada amostra simples foram homogeneizadas para compor uma amostra composta de cada camada. Nestas amostras compostas de solo, foram determinados os teores de areia, silte e argila pelo método do densímetro; densidade do solo e pH em água (1:2,5) de acordo com as metodologias da Embrapa (1997). Os teores de fósforo e potássio extraíveis com Mehlich-1 foram quantificados por colorimetria e fotometria de chama, respectivamente (Embrapa, 1997). O teor de P extraível por água foi determinado segundo a metodologia de Ohno & Zibilske (1991). Os teores de cálcio e magnésio trocáveis foram extraídos com KCl 1 mol L⁻¹ e quantificados por espectrofotometria de absorção atômica (Embrapa, 1997). Sub-amostras foram passadas em peneira de malha de 0,149 mm para análise de C orgânico por oxidação úmida, N total (N orgânico mais N mineral), pelo método de Kjeldahl (Embrapa, 1997) e fósforo total, por colorimetria, após digestão com mistura de H₂SO₄ concentrado e H₂O₂ (Thomas et al., 1967).

Amostras de esterco foram coletadas em nove das 18 áreas, com a finalidade de quantificar os teores de N, P, K, Ca e Mg aportados pelo esterco. Uma sub-amostra de esterco, coletada de cada área, foi seca em estufa de ventilação de ar forçada a 65°C, passada em moinho e digeridas com uma mistura de H₂SO₄ concentrado e H₂O₂ (Thomas et al., 1967); no digerido determinou-se N por destilação com arraste de vapor, P por colorimetria, K, Ca e Mg por espectrofotometria de absorção atômica (Embrapa, 1999). Determinaram-se também os teores de celulose, hemicelulose, lignina e cinzas (Van Soest, 1963).

O efeito da adubação com esterco na acumulação de nutrientes no solo, para cada profundidade, foi avaliado pelo teste-t de Student, comparando-se as médias das áreas adubadas com as das áreas não adubadas.

Por tratar-se do nutriente menos móvel e o mais deficiente nos solos da região agreste e semi-árida (Salcedo, 2006), o deslocamento vertical de P foi avaliado de forma mais detalhada: as 22 áreas foram agrupadas em quatro faixas, com base na concentração de P total na camada de 0-20 cm; a faixa 1 ($\leq 110 \text{ mg kg}^{-1}$) incluiu as quatro amostras das áreas não adubadas, enquanto as adubadas ficaram distribuídas na faixa 2 (111–220 mg kg^{-1} , $n=9$), na faixa 3 (221–330 mg kg^{-1} , $n=5$) e na faixa 4 (331–440 mg kg^{-1} , $n=4$), sendo n o número de áreas. As amostras das duas camadas seguintes mantiveram-se no mesmo grupo atribuído à da primeira camada.

As diferenças entre as quatro faixas mencionadas em relação aos teores de P total, nas camadas de 20-40 e 40-60 cm, e de P solúvel em água, nas camadas de 0-20, 20-40 e 40-60 cm, foram submetidas à análise de variância para cada profundidade, e as médias comparadas pelo teste HSD Tukey ($p < 0,05$) para número desigual de repetições. Devido à falta de homogeneidade das variâncias nos teores de P solúvel em água (teste de Levene), a análise estatística foi realizada com os dados transformados para $\log_{10}(x)$ (Schabenberger & Pierce, 2002).

Foi verificado se a acumulação média de nutrientes nas áreas adubadas (0-60 cm) guardava relação com o intervalo de anos de adubação informado pelos agricultores (entre 15 e 40 anos); para isso, foram calculadas as entradas de cada nutriente, com base numa composição média do esterco das propriedades e em uma dose média de 16 Mg ha^{-1} de esterco (85% MS) e 55 kg ha^{-1} de N como fertilizante comercial, com base em informações dos produtores. A estimativa de retiradas de nutrientes foi baseada em valores médios de produtividade da seqüência feijão-batatinha, de 1.285 e 500 kg ha^{-1} para palha e grão de feijão, respectivamente, e de 6.000 kg ha^{-1} para batatinha, e em dados de composição química para essas culturas, que foram os seguintes, feijão: N=1,9 e 3,93%, P=0,22 e 0,34%, K=1,8 e 1,12%, Ca=0,80 e 0,62%, Mg=0,4 e 0,85% para palha e grão, respectivamente, e batatinha: N=0,9%, P=0,05%, K=1,3%, Ca=0,08% e Mg=0,06% para o tubérculo (Yorinori, 2003; Andrade et al., 2004; Sampaio et al., 2004; e Silva et al., 2007); a extração pelo caupí após a batatinha não foi computada devido à baixa frequência deste plantio.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A aplicação contínua de esterco proporcionou um aumento significativo no pH e nos teores de todos os elementos na camada de 0-20 cm, em relação às áreas não adubadas (Tabela 1). Nas camadas de 20-40 e 40-60 cm, apenas os teores de C e N não apresentaram aumentos significativos com a aplicação de esterco. Os teores de P, Ca, Mg e K disponíveis dos solos adubados foram classificados como altos, segundo o manual de sugestão de adubação da Emater (1979), em decorrência dos aportes desses nutrientes pelo esterco (Tabela 2).

Os teores de nutrientes nas amostras de esterco foram muito variáveis e apresentaram a seguinte ordem: $Ca > K > N > Mg > P$ (Tabela 2). Na maioria das pesquisas que utilizaram esterco bovino o N apresentou o maior teor (Cassol et al., 2001), mas em alguns casos o teor de Ca foi maior ou se assemelhou ao teor de N (Sharpley et al., 2004). Além do N, os demais nutrientes no esterco também apresentaram baixos teores (Tabela 2), quando comparados com valores encontrados em outros trabalhos (Cassol et al. 2001; Ajiboye et al., 2004; Sharpley et al., 2004).

A adição do esterco geralmente não modifica o pH do solo, mas quando há uma aplicação contínua do adubo orgânico poderá ocorrer aumento significativo do pH (Mitchell & Tu, 2006). Os aumentos do pH em água oscilaram entre 0,5 e 1 unidades (Tabela 1), provavelmente devido ao aporte de Ca (Tabela 2) em conjunto com o efeito tampão de bicarbonatos e ácidos orgânicos, proporcionados pela adição do esterco por longos períodos (Sharpley & Moyer, 2000; Eghball, 2002).

O teor médio de C das áreas adubadas foi quase o dobro das não adubadas, na camada de 0-20 cm ($p < 0,05$), e aumentou entre 20 e 30% nas duas camadas seguintes, mas sem atingir significância. O esterco continha um teor médio (14%) de lignina (Tabela 2), sendo esta uma substância de lenta decomposição e precursora de substâncias húmicas (Vanlauwe et al., 2005), o que deve ter contribuído com os acréscimos de C observados, ao longo do tempo. O nitrogênio da matéria orgânica apresentou a mesma tendência que o C, mas o acréscimo foi um pouco maior (Tabela 1), o que estreitou a relação C:N nas áreas adubadas em relação às não adubadas, tendência observada nas três camadas. Em solos com textura semelhante, Woods & Schuman (1988) observaram estreitamento na relação C:N após um período de 25 anos de cultivo, comparando-os com solos sob pastagem nativa. Fraga & Salcedo (2004), em solos do semi-árido nordestino com mais de 20 anos de cultivo, também observaram

estreitamento da relação C:N em áreas cultivadas degradadas em relação a áreas nativas adjacentes.

O fósforo disponível nas áreas adubadas aumentou 20 (0-20 cm), 22 (20-40 cm) e 25 vezes (40-60 cm) em relação às não adubadas (Tabela 1), devido ao teor médio elevado de P no esterco utilizado na região (Tabela 2), e ao fato de uma elevada proporção deste P, no esterco, estar em formas disponíveis (Cassol et al., 2001; Ajiboye et al., 2004). A deficiência de P é intensa e generalizada na região: oito áreas sob plantio de mandioca em solos arenosos sem adubação apresentaram teor médio de P Mehlich-1 inferior a 4 mg kg⁻¹ de solo (Costa, 2007) e em microbacia com 800 ha de extensão nos municípios de Areia e Remígio, 133 amostras sob pastagem apresentaram 2,5 mg kg⁻¹ solo de P Mehlich-1, enquanto que 127 amostras sob capineira e roçado tinham 5,9 mg kg⁻¹; aumento que foi significativo ($p < 0,05$) e causado por adições ocasionais de esterco (Santos, 2006).

Os aumentos significativos ($p < 0,05$) no teor de P total nas camadas de 20-40 e 40-60 cm em relação às áreas não adubadas (Figura 1) indicam o deslocamento vertical de P. O fósforo solúvel em água corrobora esse deslocamento, uma vez que os teores ao redor de 7 mg kg⁻¹ na camada mais profunda (40-60 cm) foram significativamente maiores ($P < 0,05$) que nas áreas não adubadas (Figura 2). Esse P solúvel em água fica susceptível de lixiviação por chuvas intensas. A baixa capacidade de adsorção de P dos solos arenosos (Rheinheimer et al., 2003) deve ter contribuído para esse deslocamento vertical. Em relação às formas químicas de P, a literatura aponta tanto para o deslocamento em formas inorgânicas (Chardon et al., 2007) quanto orgânicas (Djodjic et al., 2004). Deve-se considerar que a maior parte de P contido no esterco está em formas inorgânicas (P-resina) (Cassol et al., 2001). A contaminação com P dos lençóis freáticos é um tema atual em vários países que utilizam este insumo, uma vez que a dose de esterco a ser aplicada baseia-se na necessidade de N das culturas, propiciando a adição excessiva de P ao solo (Griffin et al., 2003; Ajiboye et al., 2004; Djodjic et al., 2004).

Considerando que o detalhamento do deslocamento vertical foi para um nutriente de baixa mobilidade (Figuras 1 e 2), é possível inferir que os acréscimos significativos nos teores de K extraível e Ca e Mg trocáveis em profundidade (Tabela 1) estejam indicando perdas desses cátions por drenagem bem maiores que as de P.

Os estoques médios de nutrientes na camada de 0-60 cm do solo das áreas adubadas e não adubadas com esterco, foram calculados com base nos dados da Tabela 1 e mostraram uma acumulação elevada de C (18,9 Mg ha⁻¹) e nutrientes, na ordem de 2 Mg ha⁻¹ para o N total e Ca, e de menos de 1 Mg ha⁻¹ para os demais nutrientes (Tabela 3). A relação C/N das

quantidades acumuladas é muito próxima da relação C/N da matéria orgânica dos solos adubados (Tabela 1). Acumulações de N total, P total e K extraível na camada de 0-20 cm de solo cultivado com batatinha e adubado anualmente com esterco ou esterco + adubação, durante cinco anos, também foram observados por Silva et al (2007).

No balanço realizado entre entradas e saídas de nutrientes no solo, as saídas foram menores que os aportes, o que resultou em saldos positivos anuais para todos os nutrientes (Tabela 3). O cálcio apresentou o maior saldo positivo em relação aos demais nutrientes (168 kg ha⁻¹ ano⁻¹) em virtude de sua elevada concentração nos estercos da região (Tabela 2) e baixa exportação pela batatinha (5 kg ha⁻¹, Yorinori, 2003) e pelo feijão (13 kg ha⁻¹, Andrade et al., 2004; Sampaio et al., 2004). O nitrogênio foi o segundo nutriente adicionado em excesso, provavelmente devido ao uso adicional de fertilizantes comerciais no cultivo da batatinha.

Com um excesso anual de P de 32 kg ha⁻¹ ano⁻¹ (Tabela 3) seria necessário pelo menos 30 anos para atingir a acumulação observada de 973 kg ha⁻¹ na camada de 0-60 cm, uma vez que vem acontecendo perdas de P. Este período fica dentro dos intervalos de cultivo na região relatados pelos agricultores. Multiplicando-se os saldos anuais dos demais nutrientes por esse valor de 30 anos, observou-se que as acumulações teóricas, foram maiores que os estoques acumulados determinados experimentalmente (Tabela 3). As quantidades excedentes (Tabela 3, última coluna) foram interpretadas como perdas por drenagem profunda. Embora os valores absolutos dessas estimativas devam ser considerados com cautela, por conta de variações nas entradas (por exemplo, não foram computadas entradas via fixação biológica pelas leguminosas) e nas saídas ao longo desse período de 30 anos ou maior, as estimativas não deixam dúvidas quanto a ocorrência de perdas consideráveis de nutrientes nas condições de manejo na região.

Admitindo-se que as perdas relativas entre nutrientes sejam as indicadas na Tabela 3, chama a atenção o fato do N total aparecer como o segundo nutriente mais conservativo nesses solos arenosos. A entrada anual média de N é de 171 kg ha⁻¹ sendo que 116 kg ha⁻¹ em forma orgânica (esterco) e 55 kg ha⁻¹ em forma mineral, esta última apresentando um maior potencial de lixiviação. Entretanto, em experimento de incubação de esterco, observou-se imobilização de N do solo durante 60 dias após sua adição (Menezes e Salcedo, 2007). Em experimentos de campo com batatinha (5 anos), adubada com esterco ou esterco + *Crotalaria juncea*, esta última combinação propiciou as maiores retiradas de N pela cultura (Silva et al., 2007), indicando que a adição de esterco combinada com uma fonte lábil irá diminuir a probabilidade de perdas.

Em relação às bases trocáveis, era esperado que apresentassem perdas elevadas, considerando-se a textura arenosa e a baixa capacidade de troca desses solos.

O esterco é um recurso escasso na região e tanto pode ser uma fonte de renda para o agricultor, no caso de venda do produto, como um meio de repor ao solo os nutrientes retirados pelas culturas. Os resultados encontrados indicam a necessidade premente de estudos visando otimizar as doses utilizadas assim como também avaliar o efeito residual dos nutrientes aportados por esse insumo.

CONCLUSÕES

1. A quantidade de nutrientes adicionados anualmente pelo esterco na região excede as exigências das culturas e resulta em acumulações médias significativas de C, N, P, K, Ca e Mg na camada de 0-20 cm.
2. Uma parte significativa das acumulações de P total, P-Mehlich-1 e P solúvel em água, além de K, Ca e Mg, encontram-se também nas camadas de 20-40 e 40-60 cm, indicando migração vertical desses nutrientes e potencial de perdas por drenagem profunda.

AGRADECIMENTOS

Aos funcionários do Laboratório de Fertilidade de Solos do grupo de Radioagronomia pela ajuda nas análises e ao Inter-American Institute for Global Change (IAI) e CNPq pelo apoio financeiro. Aos agricultores responsáveis pelas áreas estudadas, por terem facilitado o trabalho de amostragem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AJIBOYE, B.; AKINREMI, O. O.; RAEZ, G. J. Laboratory characterization of phosphorus in fresh and oven-dried organic amendments. *Journal of Environmental Quality*, v.33, p.1062-1069, 2004.
- ANDRADE, C. A. B.; PATRONI, S. M. S.; CLEMENTE, E; SCAPIM, C. A. Produtividade e qualidade nutricional de cultivares de feijão em diferentes adubações. *Ciência Agrotécnica*, v.28, p.1077-1086, 2004.
- CASSOL, P. C.; GIANELLO, C.; COSTA, V. E. U. Frações de fósforo em estrumes e sua eficiência como adubo fosfatado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.25, p.635-644, 2001.
- CHARDON, W. J.; AALDERINK, G. H.; SALM, VAN DER C. Phosphorus leaching from cow manure patches on soil columns. *Journal of Environmental Quality*, v.36, p.17-22, 2007.
- COSTA, A. A. Diagnóstico da fertilidade do solo para a cultura da mandioca (*Manihot esculenta*, Crantz) na mesorregião do agreste paraibano. 2007. 40p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Paraíba, Areia.
- DJODJIC, F.; BÖRLING, K.; BERGSTRÖM, L. Phosphorus leaching in relation to soil type and soil phosphorus content. *Journal of Environmental Quality*, v.33, p.678-684, 2004.
- EGHBALL, B. Soil properties as influenced by phosphorus – and nitrogen – based manure and compost applications. *Agronomy Journal*, v.94, p.128-135, 2002.
- EMATER. Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural (João Pessoa, PB). Manual de Sugestão de Adubação para o Estado da Paraíba. Primeira Aproximação. João Pessoa: EMATER-PB, 1979. 105p.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Manual de métodos de análise de solo. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa-CNPS, 1997. 212p.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. (Rio de Janeiro,RJ). Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília:Embrapa-SPI; Rio de Janeiro: Embrapa-CNPS, 1999. 412p.
- FRAGA, V. da S. & SALCEDO, I. H. Declines of organic nutrient pools in tropical semi-arid soils under subsistence farming. *Soil Science Society of America Journal*, v.68, p.215-224, 2004.
- GALVÃO, S. R. S.; SALCEDO, I. H.; SANTOS, A. C. Frações de carbono e nitrogênio em função da textura, do relevo e do uso do solo na microbacia do Agreste em Vaca Brava (PB). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.29, p.955-962, 2005.

GRIFFIN, T. S.; HONEYCUTT, C. W.; HE, Z. Changes in soil phosphorus from manure application. *Soil Science Society of America Journal*, v.67, p.645-653, 2003.

MENEZES, R. S. C. & SALCEDO, I. H. Mineralização de N após incorporação de adubos orgânicos em um Neossolo Regolítico cultivado com milho. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.11, p.361-367, 2007.

MITCHELL, C. C. & TU, S. Nutrient accumulation and movement from poultry litter. *Soil Science Society of America Journal*, v.70, p.2146-2153, 2006.

OHNO, T. & ZIBILSKE, L. M. Determination of low concentrations of phosphorus in soil extracts using malachite green. *Soil Science Society of America Journal*, v.55, p.892-895, 1991.

RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I.; CONTE, E.; KAMINSKI, J.; GATIBONI, L.C. Dessorção de fósforo avaliada por extrações sucessivas em amostras de solo provenientes dos sistemas plantio direto e convencional. *Ciência Rural*, v.33, p.1053-1059, 2003.

SALCEDO, I. H. Biogeoquímica do fósforo em solos da região semi-árida do NE do Brasil. *Revista de Geografia*, v.23, p.108-123, 2006.

SANTOS, A. C. Fertilidade do solo e redistribuição de ^{137}Cs em função da cobertura vegetal, relevo e classes texturais, em uma bacia hidrográfica do estado da Paraíba. 2004. 67p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

SABOURIN, E.; SILVEIRA, L. M.; TONNEAU, J. P.; SIDERSKY, P. Fertilidade e agricultura familiar no Agreste Paraibano: um estudo sobre o manejo da biomassa. Esperança-PB: CIRAD-TERRA/ASPTA, 2000. 59p.

SAMPAIO, E. V. S. B.; TIESSEN, H.; ANTONINO, A. C. D. ; SALCEDO, I. H. . Residual N and P fertilizer effect and fertilizer recovery on intercropped and sloe-cropped corn and beans in semiarid northeast Brazil. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, v.70, p.1-11, 2004.

SCHABENBERGER, O. & PIERCE, F.J. *Contemporary Statistical Models for the Plant and Soil Sciences*. CRC Press, 2002, 753 p.

SHARPLEY, N. A.; McDOWELL, R. W.; KLEINMAN, J. A. Amounts, Forms, and Solubility of Phosphorus in Soils Receiving Manure. *Soil Science Society of America Journal*, v.68, p.2048-2057, 2004.

SHARPLEY A. N. & MOYER, B. Phosphorus forms in manure and compost and their release during simulated rainfall. *Journal of Environmental Quality*, v.29, p.1462-1469, 2000.

SILVA, T. O.; MENEZES, R. S. C.; TIESSEN, H.; SAMPAIO, E. V. S. B.; SALCEDO, I. H. & SILVEIRA, L. M. Adubação Orgânica da Batata com Esterco e/ou *Crotalaria Juncea*. I – Produtividade vegetal e estoque de nutrientes no solo em longo prazo. *Revista Brasileira de*

Ciência do Solo, v.31, p.39-49, 2007.

THOMAS, R. L.; SHEARD, R. W.; MOYER, J. R. Comparison of conventional and automated procedures for nitrogen, phosphorus and potassium analysis of plant material using single digest. *Agronomy Journal*, v.59, p.240-243, 1967.

VANLAUWE, B.; GACHENGO, C.; SHEPHERD, K.; BARRIOS, E.; CADISCH, G.; PALM, C. A. Laboratory validation of a resource quality-based conceptual framework for organic matter management. *Soil Science Society of America Journal* v.69, p.1135-1145, 2005.

VAN SOEST, P. J. Use of detergents in the analysis of fibrous feeds. II. A rapid method for the determination of fiber and lignin. *Journal of the Association of Official Agricultural Chemists*, v.46, p.829-835, 1963.

WOODS, L. E. & SCHUMAN, G. E. Cultivation and slope position effects on soil organic matter. *Soil Science Society of America Journal*, v.52, p.1371-1376, 1988.

YORINORI, G. T. Curva de crescimento e acúmulo de nutrientes pela cultura da batata cv. 'Atlantic'. 2003. 66p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz/Universidade de São Paulo, Piracicaba.

Tabela 1. Atributos físicos e químicos de amostras de solo coletadas em três profundidades de áreas sem ou com aplicação de esterco.

Adubação	Areia	Silte	Argila	Ds ⁽¹⁾	pH	COT ⁽²⁾	Nt ⁽³⁾	P ex. ⁽⁴⁾	P total	K ⁽⁴⁾	Ca ⁽⁵⁾	Mg ⁽⁵⁾
	----- g kg ⁻¹ -----			g mL ⁻¹		----g kg ⁻¹ ----		-----mg kg ⁻¹ -----			cmol _c kg ⁻¹	
0 – 20 cm												
Sim	861	100	39	1,53	6,7a	8,5a	0,87a	74a	274a	141a	1,70a	0,71a
Não	839	112	49	1,54	5,5b	3,9b	0,33b	3,8b	86b	63b	0,55b	0,18b
20 – 40 cm												
Sim	793	146	61	1,49	6,3a	5,1a	0,51a	41a	195a	117a	1,60a	0,66a
Não	822	98	80	1,54	5,3b	3,8a	0,32a	1,8b	83b	26b	0,37b	0,17b
40 – 60 cm												
Sim	778	156	66	1,50	6,0a	4,1a	0,44a	26a	155a	103a	1,40a	0,63a
Não	817	107	76	1,55	5,4a	3,5a	0,29a	1,1b	75b	36b	0,36b	0,14b

Letras iguais na coluna não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Student. ⁽¹⁾ Ds = densidade do solo; ⁽²⁾ Carbono orgânico total; ⁽³⁾ Nitrogênio total; ⁽⁴⁾ Extraível por Mehlich-1; ⁽⁵⁾ Trocável.

Tabela 2. Teor médio, mínimo, máximo, desvio padrão e coeficiente de variação (%) de N, P, K, Ca, Mg, cinzas, celulose, hemicelulose e lignina em amostras de esterco bovino (n=09) coletadas em nove propriedades do município de Esperança/PB.

Nutriente	Média	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação
N (g kg ⁻¹)	8,7	4,6	18	4,0	46
P (g kg ⁻¹)	3,0	1,6	5,9	1,6	54
K (g kg ⁻¹)	12	4,2	28	8,1	67
Ca (g kg ⁻¹)	14	6,2	26	6,3	45
Mg (g kg ⁻¹)	5,3	2,9	7,5	1,7	32
Cinzas (%)	56	41	72	22	38
Celulose (%)	11	6,7	16	3,8	33
Hemicelulose (%)	8,1	3,4	16	4,1	51
Lignina (%)	14	8,8	18	3,8	28

Tabela 3. Estoque e balanço anual estimado de nutrientes na camada de 0-60 cm em solos adubados ou não com esterco bovino e perdas estimadas acumuladas (30 anos) nas áreas adubadas.

Nutriente	Estoque ⁽¹⁾			Balanço Anual			Perdas estimadas
	Não adubado	Adubado	Acumulação (A)	Entrada ⁽²⁾	Saída ⁽³⁾	Saldo Anual (SA)	
	----- kg ha ⁻¹ -----			kg ha ⁻¹		kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	kg ha ⁻¹
P total	734	1707	973	40	8	32	0
N total	2920	4952	2032	171	98	73	-153
K Mehlich-1	397	1031	634	160	107	53	-962
Ca trocável	798	2907	2109	186	18	168	-2919
Mg trocável	185	719	534	71	13	58	-1204

⁽¹⁾ Os estoques foram calculados com base nos dados da Tabela 1 ⁽²⁾ Baseada no teor médio da Tabela 2 e em dose média anual de 16 Mg ha⁻¹ de esterco curtido (85% matéria seca) + 55 kg ha⁻¹ de N de fertilizante mineral. ⁽³⁾ Extração de nutrientes pelo tubérculo de batata (produtividade de tubérculo=6000 kg ha⁻¹) (Silva et al., 2007; Yorinori, 2003) e feijão-comum (produtividade de palha=1285 kg ha⁻¹ e grão=500 kg ha⁻¹) (Andrade et al., 2004; Sampaio et al., 2004). ⁽⁴⁾ Perda = Ai - ((A-P/SA-P)*SAi), onde i=nutrientes, exceto fósforo (P).

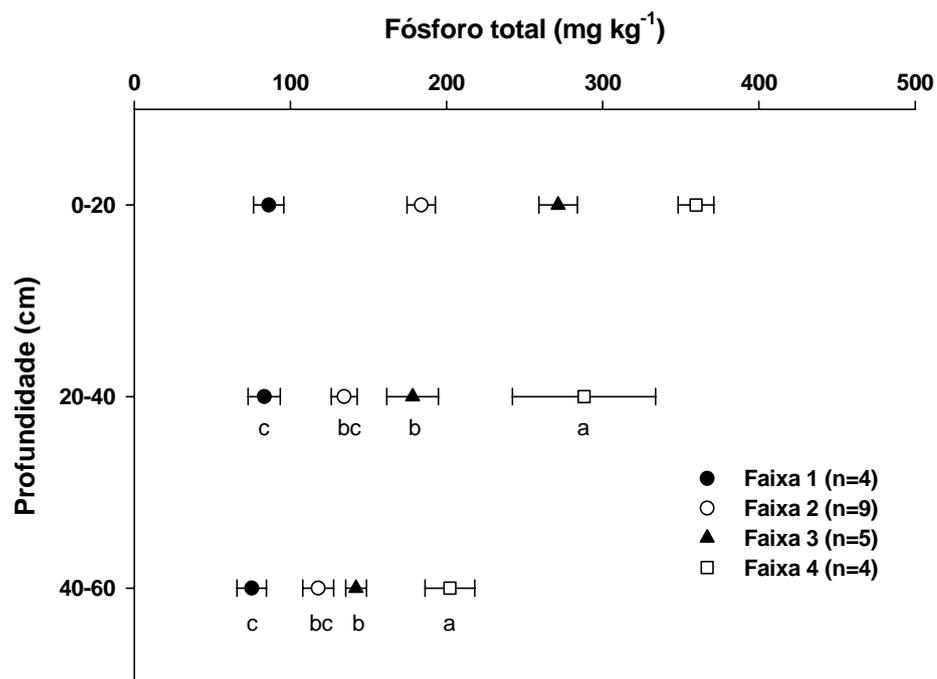


Figura 1. Teor médio e erro padrão de P total em amostras de solo agrupadas em quatro faixas pelo teor de P total na camada de 0-20 cm (Faixa 1: ≤ 110 ; Faixa 2: 111-220; Faixa 3: 221-330; Faixa 4: 331-440). Médias seguidas de letras iguais na mesma profundidade não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

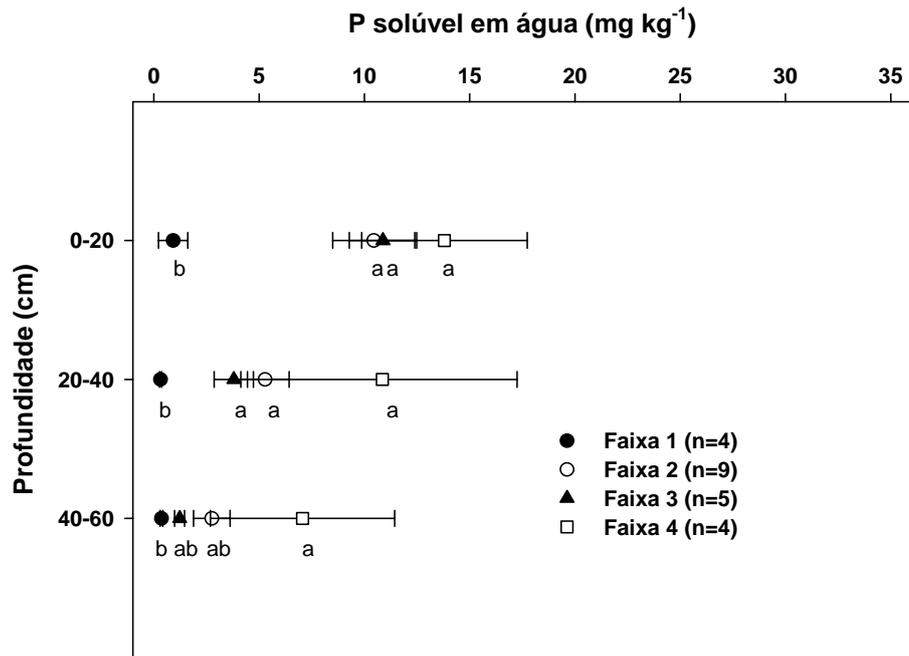


Figura 2. Teores médios e erro padrão de P solúvel em água em amostras de solo agrupadas em quatro faixas pelo teor de P total na camada de 0-20 cm (Faixa 1: ≤ 110 ; Faixa 2: 111-220; Faixa 3: 221-330; Faixa 4: 331-440). Médias seguidas de letras iguais na mesma profundidade não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

CAPÍTULO 2

FRAÇÕES DE FÓSFORO EM TRÊS CAMADAS DE SOLOS ARENOSOS ADUBADOS COM ESTERCO POR LONGOS PERÍODOS

Sandra Regina da Silva Galvão & Ignacio Hernan Salcedo

Trabalho enviado para a **Revista Brasileira de Ciência do Solo**

FRAÇÕES DE FÓSFORO EM TRÊS CAMADAS DE SOLOS ARENOSOS ADUBADOS COM ESTERCO POR LONGOS PERÍODOS ¹

Sandra Regina da Silva Galvão² & Ignacio Hernán Salcedo³

RESUMO

Frações de P foram quantificadas em amostras de solo de áreas não adubadas e adubadas com esterco por longos períodos e em amostras do esterco utilizado na região. As amostras de solo foram coletadas nas camadas de 0-20, 20-40 e 40-60 cm em 18 áreas agrícolas que receberam adições anuais de esterco por pelo menos dois anos e, como controle, em quatro áreas sob pastagem, não adubadas. As amostras de solo foram submetidas ao fracionamento seqüencial do P, por extração com água (P_w), resina (P_{res}), $NaHCO_3$ ($P_{i_{bic}}$ e $P_{o_{bic}}$), $NaOH$ ($P_{i_{hid}}$ e $P_{o_{hid}}$), H_2SO_4 ($P_{ácido}$) e, finalmente, digestão com H_2SO_4/H_2O_2 (P_{resd}). As amostras de esterco obtidas em nove das 18 propriedades foram analisadas quanto aos teores de P por extrações independentes com água, resina, Mehlich-1, H_2SO_4 e $NaOH$. A fração $P_{ácido}$, considerado como P ligado ao Ca, foi a que apresentou os maiores acréscimos ($P < 0,01$) como resultado das adições de esterco, aumentando de 8,4 para 43,8 $mg\ kg^{-1}$ nas amostras com menor e maior teor de P_t , respectivamente. A soma de P_w , P_{res} e $P_{i_{bic}}$, formas estas consideradas lábeis, apresentou acréscimos semelhantes à fração $P_{ácido}$, em função da adição de esterco, enquanto que, a fração $P_{i_{hid}}$, apresentou o menor aumento. As formas de P orgânico também aumentaram, sendo maiores ($P < 0,01$) os aumentos da fração $P_{o_{hid}}$, menos lábil, que os da fração $P_{o_{bic}}$. O fósforo residual foi praticamente metade do P_t , independentemente do teor deste último. Os acréscimos observados nas distintas frações foram justificados pelo elevado teor médio de P_w (36%), de $P_{ácido}$ (34%) e de $P_{o_{hid}}$ (30%) do esterco. Variações significativas nas proporções de P entre as camadas de solo indicaram o movimento descendente do P em formas orgânicas.

Termos de Indexação: fracionamento de P, fósforo orgânico, migração vertical de P.

⁽¹⁾ Parte do trabalho de Tese de Doutorado do primeiro autor, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). 46
Recebido para publicação em / / e aprovado em / /

⁽²⁾ Doutoranda em Tecnologias Energéticas e Nucleares, Grupo de Fertilidade de Solos/Radioagronomia, Departamento de Energia Nuclear (DEN), Universidade Federal de Pernambuco UFPE, Av. Prof. Luiz Freire, 1000, Cep.:50740-540, Recife (PE). Bolsista CNPq. E-mail: reginassg@uol.com.br

⁽³⁾ Professor Titular do Departamento de Energia Nuclear, UFPE. E-mail: salcedo@ufpe.br

SOIL P FRACTIONS IN THREE LAYERS OF SANDY SOILS AMENDED WITH CATTLE MANURE FOR LONG PERIODS.

Sandra Regina da Silva Galvão & Ignacio Hernán Salcedo

SUMMARY

Phosphorus fractions were determined in soil samples obtained from areas fertilized or not with farmyard cattle manure (FYM) for long periods and in samples of FYM used in the region. Soil samples from the 0-20; 20-40 e 40-60 cm layers were taken from 18 cultivated areas that had received additions of FYM for at least two years and in four areas under pasture that were not fertilized. The soil samples were sequentially extracted with water (P_w), resin (P_{res}), NaHCO_3 ($P_{i_{bic}}$ e $P_{o_{bic}}$), NaOH ($P_{i_{hid}}$ e $P_{o_{hid}}$), H_2SO_4 (P_{acid}) and, finally, digested with $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}_2$ (P_{resd}) and the extracts analyzed for P. FYM samples were independently extracted with water, resina, Mehlich-1, H_2SO_4 , NaOH or acid digestion. The P_{acid} fraction, related to Ca-P forms, showed the greatest increases ($P < 0.01$) as a result of FYM additions, raising from $8,4 \text{ mg kg}^{-1}$ in non-fertilized samples to $43,8 \text{ mg kg}^{-1}$ in samples showing greater P_t contents. The sum of P_w , P_r and $P_{i_{bic}}$, considered as labile P forms, showed comparable increases with P_{acid} , while $P_{i_{hid}}$ showed the smaller increase due to FYM additions. Organic P forms also increased, more so the fraction considered less labile, $P_{o_{hid}}$, than the more labile one $P_{o_{bic}}$. The residual P fraction was practically half of P_t , independently of changes in total P content. Increases observed in the various fractions were justified by the large average concentration of P_w (36%), P_{acid} (34%), and $P_{o_{hid}}$ (30%) in the FYM. Significant changes in the proportion of P forms among soil layers indicated the downward movement of organic P forms.

Index terms: fractionation of P, organic phosphorus, leaching of P

INTRODUÇÃO

Dados de acumulação de P (Sharpley et al., 2004) e perdas de P por lixiviação (Koopmans et al., 2007) associados com o uso de esterco animal têm sido relatados em sistemas de produção agrícola de países industrializados (Siddique & Robinson, 2004; Anderson & Magdoff, 2005). Normalmente, a recomendação da dose de esterco baseia-se na necessidade de N (Akhtar et al., 2004), mas como a relação N/P do esterco (2,6: 1) geralmente é menor do que a da taxa de absorção da planta (5,0: 1), a adição supera a necessidade das culturas, resultando em acúmulo e potencial de perda de P dos solos. Evidências nesse sentido, no âmbito da agricultura familiar de baixos insumos na região tropical semi-árida foram recentemente publicadas (Galvão et al., 2008; Menezes & Oliveira, 2008). A relevância dessa informação está ligada ao uso racional de um insumo que é escasso na região e as considerações ambientais, decorrentes do potencial de contaminação do lençol freático.

Nessas áreas, a utilização de esterco bovino ou caprino é a principal alternativa para melhorar o suprimento de nutrientes (Sabourin et al., 2000; Menezes & Salcedo, 2007; Silva et al., 2007). Nas culturas de subsistência (milho, feijão e mandioca) seu uso não é generalizado, dependendo da disponibilidade local e do preço, enquanto nos cultivos mercantis como a batatinha, a aplicação é anual e muitas vezes complementada com adubo nitrogenado mineral (Sabourin et al., 2000). As doses são elevadas (16 Mg ha⁻¹ em média) e há poucos trabalhos que relatam o destino dos nutrientes adicionados nessas condições (Silva et al., 2007; Galvão et al., 2008; Menezes & Oliveira, 2008).

A maior parte do P do esterco encontra-se em formas inorgânicas (Sharpley & Moyer, 2000; Cassol et al., 2001; Eghball, 2003). Dou et al. (2000) constatou que aproximadamente 70% do P de esterco bovino foram extraídos por água; um caso deste em solos arenosos, com baixos teores de matéria orgânica e capacidade limitada de retenção de água e P, o potencial de perdas por lixiviação é elevado (Galvão et al., 2008), uma vez que as chuvas na região semi-árida são normalmente irregulares e de alta intensidade.

As informações relacionadas com os efeitos da adição de resíduos animais nas formas de P no solo provêm, principalmente, de países com uma agropecuária desenvolvida, que apresentam aplicações significativas desse tipo de resíduo em formas líquidas (Hountin et al., 2000), semi-sólidas (He & Honeycutt, 2001) e sólidas (Hao et al., 2008), por longos períodos. A extração seqüencial de P (Hedley et al., 1982) tem fornecido informações relevantes sobre a distribuição do P nos compartimentos inorgânicos e orgânicos do solo. As frações de P extraídas estão associadas a um grau decrescente de disponibilidade às plantas (Araújo et al., 1993; Araújo et al., 2003). As

formas de P extraídas por água, resina e bicarbonato de sódio são consideradas as frações mais lábeis; em seguida, vêm às extraídas por hidróxido de sódio, que são frações moderadamente lábeis, incluindo P associado a óxidos de Al e Fe; depois, as extraídas por ácido que estão ligadas à apatita e outros fosfatos de Ca menos reativos; finalmente, o P determinado por uma digestão peróxido/sulfúrica, que representa o fosfato mais recalcitrante, que não pôde ser extraído nas frações anteriores (Araújo et al., 1993). De forma geral, trabalhos com essa metodologia em solos adubados com esterco restringiram-se à camada superficial (Sharpley et al., 2004; Lehmann et al., 2005), havendo menos informações disponíveis sobre o enriquecimento relativo das frações de P em profundidade (Sue et al., 2007).

O presente trabalho apresenta dados de frações orgânicas e inorgânicas de P para 22 áreas de agricultura familiar com solos arenosos e históricos variáveis de adição de esterco, nas camadas de 0-20, 20-40 e 40-60 cm e para nove amostras de esterco bovino utilizados pelos agricultores.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram escolhidas 22 propriedades de agricultura familiar do município de Esperança, no Agreste da Paraíba. Nestas propriedades há pequenas áreas, de no máximo 10 ha, cultivadas com batatinha (*Solanum tuberosum* L.) e erva-doce (*Pimpinella anisum* L.) consorciadas, considerados cultivos mercantis da região, além de roçados tradicionais de milho (*Zea mays* L.), feijão mulatinho (*Phaseolus vulgaris* L.), feijão de corda (*Vigna unguiculata* L.), mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) e fava (*Vicia faba* L.) (Sabourin et al., 2000). O solo dominante nas áreas amostradas é o Neossolo Regolítico eutrófico (Embrapa, 1999), de textura arenosa a arenosa-franca com relevo ondulado a suave-ondulado. A pluviosidade média anual é de 800 mm com regime de chuvas unimodal distribuídas entre os meses de março a agosto, embora tanto a média anual quanto sua distribuição podem ser muito variáveis (Sabourin et al., 2000).

Pelos históricos levantados junto aos produtores, das 22 áreas amostradas, 18 foram adubadas com esterco, enquanto quatro, com pastagens, não foram adubadas nos dez anos anteriores à amostragem. Das áreas adubadas, 14 foram adubadas entre 15 e 40 anos e quatro durante menos de seis anos. As quantidades anuais de esterco curtido (15% umidade) aplicadas variavam entre 12 e 20 Mg ha⁻¹ (dose média de 16 Mg ha⁻¹), sendo que em uma das áreas foram aplicadas 28 t ha⁻¹ nos dois anos anteriores à amostragem do presente estudo.

Na maioria dos casos, o esterco era comprado de fontes externas. Nas áreas de cultivo de batatinha, 13 dos 18 agricultores aplicavam fertilizantes comerciais nitrogenados (uréia e sulfato de amônio) em doses variando entre 32 e 67 kg ha⁻¹ de N (dose média de 55 kg ha⁻¹). A adubação orgânica e mineral era realizada no plantio da batatinha, mas esta cultura é normalmente precedida por um cultivo de feijão, dependendo da época de início das chuvas.

Os agricultores não possuem registros precisos de médio ou longo prazo relacionados com o manejo, doses de esterco aplicadas ou com a seqüência das culturas. Os cultivos implementados podem variar em função da disponibilidade de sementes, dos preços agrícolas e da percepção quanto à precipitação pluviométrica. Da mesma forma, as doses dos insumos utilizados (esterco e, ou adubo mineral), também variam em função da disponibilidade financeira do agricultor e do preço desses insumos.

Nas áreas cultivadas com o consórcio batatinha/erva-doce (normalmente 5 leirões de batatinha para cada leirão de erva-doce), foram obtidas amostras simples de solo das camadas de 0-20, 20-40, e 40-60 cm, em dez leirões de batatinha separados entre si por 4 leirões de batatinha e um de erva-doce. As amostras simples foram secas ao ar e posteriormente passadas por peneira de 2

mm. Uma quantidade igualmente pesada de solo de cada amostra simples foi tirada para compor uma amostra composta, que após homogeneizada, foi utilizada para as análises físicas e químicas. Os dados de caracterização das amostras compostas de solo foram publicados por Galvão et al. (2008). Resumidamente, amostras das áreas controle (0-20 cm) apresentaram 839, 112 e 49 g kg⁻¹ de areia, silte e argila, respectivamente, pH em água, 5,5; 3,9 g kg⁻¹ de C orgânico total (COT); 86 mg kg⁻¹ de P total e 3,8 mg kg⁻¹ de P Mehlich-1; 63 mg kg⁻¹ de K extraível; e 0,55 e 0,18 cmol_c kg⁻¹ de Ca e Mg, respectivamente. Na camada de 40-60 cm, o P e K extraíveis diminuíram para 1,1 e 36 mg kg⁻¹, e o Ca para 0,36 cmol_c kg⁻¹, enquanto os atributos restantes permaneceram com pouca alteração em relação à camada mais superficial e os valores da camada intermediária (20-40 cm) foram semelhantes aos da camada 40-60 cm.

As frações de P nas amostras compostas de solo foram extraídas sequencialmente usando o método de Hedley et al. (1982) modificado por Araújo et al. (1993). Este método separa o P do solo em cinco frações inorgânicas, duas orgânicas e uma fração residual. Subamostras de 1,0 g de solo passado em peneira de 0,250 mm, em duplicata, foram pesadas em tubos de centrifuga de 50 mL de capacidade, adicionando-se 30 mL da solução extratora e agitando-se durante 16 h. As frações de P inorgânico foram determinadas sequencialmente, na seguinte ordem: (1) Pi-água (P_w), extraída em 30 mL de água deionizada e quantificada pelo método verde-malaquita (Ohno & Zibilski, 1991); (2) Pi-resina (P_{res}), extraída com um saquinho com resina de troca aniônica e 30 mL de água deionizada. Após agitação, o P adsorvido na resina é eluído com HCl 0,5 mol L⁻¹; (3) Pi-NaHCO₃ (P_{bic}), extraída com 30 mL de NaHCO₃ 0,5 mol L⁻¹ a pH 8,5; (4) Pi-NaOH (P_{hid}), extraída com 30 mL de NaOH 0,1 mol L⁻¹, e (5) Pi-H₂SO₄ (P_{ácido}), extraída com 30 mL de H₂SO₄ 1 mol L⁻¹. O fósforo inorgânico nos extratos alcalinos foi determinado no sobrenadante, após acidificação e centrifugação do precipitado. Determinou-se também o P orgânico nos extratos de NaHCO₃ e do NaOH, da seguinte forma: numa outra alíquota, foi feita uma digestão do extrato, adicionando-se 1 mL de H₂SO₄ 12 mol L⁻¹ e 0,2 g de K₂S₂O₈ e autoclavando-se durante 1 h a 127 °C, determinando-se o P total no extrato. O fósforo orgânico foi calculado por diferença entre a concentração de P total e P inorgânico, em cada extrato. Essas frações orgânicas foram denominadas P_{obic} e P_{ohid}, de acordo com o extrator. No solo remanescente, após todas as extrações, foi feita uma digestão H₂SO₄/H₂O₂, a 360 °C, determinando-se a fração de P residual (P_{resd}). Com exceção do P extraído com água, todas as outras medidas de P nos extratos foram feitas pelo método colorimétrico de Murphy & Riley (1962), após o ajuste do pH, usando p-nitrofenol como indicador. O P total do solo (P_t) foi calculado como a soma de todas as frações determinadas.

Os teores de P nas amostras de esterco foram quantificados utilizando vários extratores em extrações separadas, tendo-se utilizado água, resina, Mehlich-1, H₂SO₄ 1 mol L⁻¹ e NaOH 0,1 mol

L^{-1} (P_i e P_o), este último de acordo com a metodologia de Hedley et al. (1982) adaptada por Cassol et al. (2001). O fósforo nos extratos foi quantificado pelo método colorimétrico de Murphy & Riley (1962). Outros detalhes da composição química das amostras de esterco foram publicados por Galvão et al. (2008).

As amostras das 22 propriedades foram consideradas representativas do tipo de manejo descrito anteriormente para a região, motivo pelo qual a análise dos dados enfatizou efeitos médios e não a análise individual de cada área, sobretudo pela ausência de históricos baseados em registros escritos, que permitisse estabelecer relações causa-efeito caso a caso. Entretanto, por tratar-se de amostras obtidas em região de solos que apresentam características relativamente homogêneas, com predomínio da fração areia e muito deficientes em P quando não adubados, considerou-se que os aumentos de P total, representavam intensidades crescentes de adição de esterco, mas com distintas combinações dose-tempo de adição.

A relação entre o P nas frações e o P total foi analisada por regressão, com o P total como variável independente e as frações de P ou combinações delas como variáveis dependentes; as equações ajustadas representam o efeito médio, para as três profundidades, do aumento proporcionado pelo P total na fração considerada. A igualdade dos coeficientes de regressão entre frações de interesse foi testada mediante o uso de contrastes ortogonais (Schabenberger & Pierce, 2002). A apresentação dos dados de cada fração separadamente por profundidade demandaria um número elevado de figuras e, por esse motivo, para avaliar o efeito da adição de esterco em profundidade, preferiu-se discretizar os dados de P total em quatro faixas, com base nos teores da camada de 0-20 cm. Na faixa 1 incluíram-se as quatro amostras das áreas não adubadas ($\leq 110 \text{ mg kg}^{-1}$), enquanto as adubadas ficaram distribuídas na faixa 2 (111–220 mg kg^{-1} , $n=9$), faixa 3 (221–330 mg kg^{-1} , $n=5$) ou faixa 4 (331–440 mg kg^{-1} , $n=4$). Para manter a correspondência vertical das amostras, aquelas de 20-40 e 40-60 cm foram alocadas na mesma faixa que a correspondente de 0-20 cm. Nesta análise, o P em cada fração foi expresso como percentagem do teor de P total. Uma vez que as variações entre camadas de solo não são independentes, devido à falta de casualização das camadas e autocorrelação dos teores de P entre elas, utilizou-se um modelo linear estatístico misto, que permite realizar análise de variância mediante o cálculo de termo adicional de erro experimental, de forma a compensar por essas condições experimentais específicas (Schabenberger & Pierce, 2002; R, 2008). As percentagens de P nas frações entre camadas, foram comparadas por contrastes ortogonais (0-20 versus 20-40 e 20-40 versus 40-60 cm).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As três frações inorgânicas consideradas lábeis, P_w , P_{res} e P_{bic} , aumentaram significativamente ($P < 0,01$) com o aumento do teor de P total (P_t) do solo, considerando-se conjuntamente as amostras das três camadas amostradas (Figura 1A). Os aumentos nos teores de P resumidos na Figura 1A podem ser justificados pelo P_w e P_{res} presentes nas amostras de esterco (1,0 e 1,2 g kg⁻¹ MS, respectivamente), que representaram ao redor de 36% do P_t contido nesse material (Quadro 1). Vale lembrar que como a extração de P do esterco não foi sequencial, ao contrário das amostras de solo, praticamente todo o P extraído pela resina foi o solúvel em água. Os valores médios obtidos no esterco ficaram dentro da faixa de 15 – 47% encontrada por Sharpley & Moyer (2000), enquanto Cassol et al (2001) chegaram a extrair 65% do P_t com resina e Ajiboye et al. (2004) 40% do P_t com água.

Na análise comparativa dos três coeficientes de regressão da Figura 1, a taxa de aumento de P_{res} foi maior ($P < 0,01$) que a das outras duas frações, que foram iguais entre si. Essa taxa foi praticamente de 0,1 mg de P_{res} por cada mg de aumento do P_t , ou seja, 10% do P adicionado na forma de esterco permaneceu extraível por resina. No caso de P_w e de P_{bic} , essa taxa foi de aproximadamente 5%. A taxa de aumento de P_{res} foi considerável, considerando-se que neste caso P_{res} não incluiu o teor de P_w e que se trata de solos dominados pela fração areia (Galvão et al., 2008), nos quais seria esperado um valor de P lábil (descontado o solúvel em água) baixo. O fósforo solúvel em água é raramente determinado em análise de solos, por apresentar-se em concentrações muito reduzidas e que geram dificuldades metodológicas, mas sua determinação é freqüente em trabalhos que estudam o efeito de aplicações de esterco (Kleinman et al., 2005).

Os teores de P_w em nove amostras foram fortemente superestimados pela equação de regressão correspondente, sobretudo para teores de P_t acima de 200 mg kg⁻¹ (Figura 1A). Essas amostras diferiram das restantes pelos seus teores de $Fe_{ox} + Fe_{DCB}$, que oscilaram entre 3 e 7 g kg⁻¹ (dados não tabelados); opostamente, as concentrações de P_w em amostras com teores de Fe extraível < 3 g kg⁻¹ foram melhor ajustados pela equação de regressão mencionada. Estes resultados assinalam a utilidade da determinação dos teores de óxidos de Fe em solos arenosos adubados com esterco, visando diagnosticar o potencial de perda de P solúvel em água.

O somatório das três frações lábeis ($P_i \text{ lábil} = P_w + P_{res} + P_{bic}$) foi comparado com o conteúdo de P extraível por álcali (P_{hid}) e por ácido ($P_{ácido}$) na totalidade das amostras (Figura 1B). A taxa de aumento da fração $P_i \text{ lábil}$ foi semelhante à de $P_{ácido}$ e ambas maiores ($P < 0,01$) que à de P_{hid} .

Entretanto, considerando-se as frações isoladamente, a extraída por ácido foi a fração inorgânica que apresentou os maiores acréscimos, considerando-se os dados das três camadas conjuntamente.

Este resultado é coerente com a composição do esterco, uma vez que, em média quase 70% do P total foi extraído pelas duas soluções ácidas testadas (Quadro 1). Descontando-se o P solúvel em água do P extraído pelos ácidos, 34 % do P no esterco apresentaram-se relacionados ao Ca, que seria assim, a segunda fração em importância no esterco. Este resultado fica justificado pela elevada concentração média de Ca, 14 g kg⁻¹ na matéria seca do esterco (Quadro 1); de fato, as adições de esterco elevaram quase 10 vezes o teor de Ca total nas amostras dos solos mais adubados em relação aos não adubados (na Figura 2A estes últimos aparecem associados a valores de P total < 90 mg kg⁻¹). Os acréscimos poderiam ter sido ainda maiores, não fosse o efeito quadrático apresentado pelos dados (Figura 2A), que foi provavelmente ocasionado pela maior lixiviação do Ca em relação ao P (Galvão et al., 2008).

Além da relação com o P total, o Ca total no solo também apresentou uma estreita relação com a fração P_{ácido} (Figura 2B). Adições de esterco contribuem com a elevação do pH do solo, de neutro a alcalino (Galvão et al., 2008), o que favorece a solubilização de fosfatos de Fe e Al enquanto os aportes de Ca promovem precipitação de fosfato de Ca (Lindsay, 1979). Comumente, em solos intemperizados da região tropical úmida (Ball-Coelho et al., 1993; Araújo et al, 1993), ou da região semi-árida quando derivados de rochas sedimentares intemperizadas (Tiessen et al., 1992; Araújo et al., 2004), as formas de P associadas ao Fe e ao Al, extraídas pelo NaOH, são proporcionalmente maiores que as ligadas ao Ca (Salcedo, 2007). A situação oposta é observada em solos derivados do cristalino na região semi-árida, nos quais predomina a fração ligada ao Ca (Silveira, 2000). No presente estudo, a proporção de P_{hid} e de P_{ácido} nas amostras não adubadas foi praticamente idêntica (Faixa 1, Quadro 2), mas adubações continuadas com esterco modificaram esta situação, passando a predominar formas ligadas ao Ca ao invés do Fe ou Al (Figura 1B e Quadro 2, níveis 3 e 4). Isso é coerente com a pequena quantidade de P no esterco extraído pelo álcali (12% do P total, Quadro 1). Graetz & Nair (1995) estudaram solos que tinham sido adubados com esterco por longos períodos e observaram que, enquanto as áreas não adubadas continham 49% de P ligado a Fe e a Al e apenas 9% ligado a Ca, as áreas adubadas continham 8% de P ligado a Fe e a Al e 70% para P ligado ao Ca, esta mudança provavelmente seja devido ao aumento do pH do solo, no qual haverá solubilização dos fosfatos de Fe e Al e precipitação dos fosfatos de Ca.

Quanto às formas orgânicas de P, ambas as frações aumentaram (P<0,01) com o aumento em P_t, mas a fração P_{hid} apresentou taxa de aumento superior (P<0,01) que a de P_{bic} (Figura 3A). Essas tendências coincidem com a labilidade atribuída ao P contido nessas frações, a de NaOH relativamente menos lábil e que tende a acumular-se no solo, e a de bicarbonato, relativamente mais

lável e que se mantém em baixa concentração, a pesar dos aumentos em P_t (Araújo et al., 1993; Silveira et al., 2006). Estes resultados são também coerentes com a composição química do esterco, que continha $1,02 \text{ g kg}^{-1}$ de P_{hid} , teor que correspondeu a 34% do P_t (Quadro 1). Cassol et al. (2001) fracionaram amostras de esterco bovino e de ave, obtendo valores de P_o total oscilando entre $0,81$ e $2,72 \text{ g kg}^{-1}$, respectivamente, ou 16 e 25%, respectivamente, do P_t . A distribuição de P nos esterco analisados no presente trabalho foi aproximadamente dois terços na forma mineral e um terço na forma orgânica; o predomínio de formas inorgânicas resulta da ação de fosfatases produzidas pelos microorganismos no rúmen e que, em meio ácido, vão hidrolisar os fosfatos orgânicos (Cassol et al., 2001). Outros estudos têm mostrado a entrada preferencial de formas inorgânicas mais do que orgânicas no solo após a aplicação de diferentes tipos de esterco por longos períodos (Sharpley et al., 2004; Akhtar et al., 2004). A maior proporção de P_o nas amostras do presente trabalho em relação à de Cassol et al. (2001) pode ter sido devida aos diferentes sistemas de extração utilizados (não seqüencial no presente caso) assim como a diferenças na dieta dos animais. Devesse ressaltar que a soma das frações de P solúvel em água, ácido e orgânica no esterco excedem a concentração de P total. Uma vez que a extração não foi seqüencial, devido às dificuldades metodológicas encontradas, é possível que as extrações não sejam totalmente aditivas, por conta da hidrólise de formas de P no esterco causada pela extração ácida e, ou, alcalina.

Considerando-se a soma das frações inorgânicas, orgânicas e o P_{resd} extraído após digestão sulfúrica, percebe-se uma distribuição relativamente constante entre a soma de P_i e de P_{resd} com os aumentos em P_t , constituindo as formas orgânicas a menor parcela (Figura 3B). Entretanto, parte de P_{resd} contém formas orgânicas de P que poderiam mudar parcialmente as proporções observadas, mas ainda não há uma metodologia que quantifique as formas orgânicas e inorgânicas presentes no P_{resd} . Vale também salientar a natureza curvilínea do ajuste dos teores de P_{resd} , que sugerem uma inversão na predominância de soma de P_i e P_{resd} com o aumento de P_t .

Para visualizar o efeito da profundidade, os teores de P_t foram discretizados em quatro faixas, a primeira delas correspondendo ao teor de P_t das áreas não adubadas (Quadro 2). Este último foi apresentado em unidades de concentração, enquanto o P nas frações o foi como percentagem daquele teor. Os acréscimos significativos na percentagem de cada fração na camada de 0-20 em relação à de 20-40 cm, e da camada de 20-40 em relação à de 40-60 foram determinados por contrastes ortogonais, cujas estimativas e níveis de significância foram resumidos no Quadro 3. Não houve interação entre profundidade da camada e nível de P_t para nenhuma das frações, motivo pelo qual os contrastes entre camadas foram realizados para o efeito principal da variável profundidade. Das frações inorgânicas, unicamente P_w apresentou acumulações ($P < 0,01$) de uma camada em relação à camada subjacente. No caso do P orgânico ambas as frações orgânicas, P_{bic} e

P_{hid} , apresentaram acumulações significativas, mas na direção oposta à de P_w . Os contrastes negativos significativos ($P < 0,01$) indicaram acréscimos preferenciais na camada de 20-40 cm em relação à superficial e na de 40-60 em relação à de 20-40, indicando movimentação vertical de P em formas orgânicas, fato também observado por Djodjic et al. (2004). Já as frações de P_i , exceto P_w mantiveram perfis inalterados ou decrescentes com a profundidade, sem sofrer modificações relativas significativas ($P < 0,01$) pelos aumentos no teor de P_t (Quadro 2).

Os resultados apresentados demonstraram claramente que vem ocorrendo uma adubação excessiva com esterco na maioria das áreas amostradas e que isto tem mudado as propriedades químicas e os mecanismos de controle do P no solo. Há oferta excessiva de P solúvel em água, parte do qual provavelmente deve ser lixiviado no início do período chuvoso, quando há pouca cobertura vegetal. Em relação às formas não solúveis, a adubação excessiva mudou o solo de um sistema equilibrado P-(Fe e Al) e P-Ca para um sistema onde predomina o Ca, não havendo informações como isto possa vir a afetar a disponibilidade de P no futuro. A relativa constância de uma proporção elevada de P_{resd} (50-60%), independentemente do teor de P_t das amostras, indica que é necessário aprimorar a metodologia do fracionamento de P no solo. Em relação à disponibilidade para as plantas do P nas várias frações determinadas, vale salientar que todas elas, inclusive a fração residual, contribuem nesse sentido, embora com intensidades relativas diferentes (Araújo et al., 1993; Araújo et al., 2003). Há necessidade também de se aprofundar estudos do efeito residual das adubações com esterco e da sua interação com as distintas frações de fósforo no solo

CONCLUSÕES

1. Adições de esterco por longos períodos resultaram em acumulações das frações de P no solo, com predomínio das frações inorgânicas em relação às orgânicas.
2. Com o aumento nos teores de P_t , as maiores taxas de acumulação foram para a soma das frações lábeis ($P_w + P_{\text{res}} + P_{\text{bic}}$) e para a fração extraível com ácido, ligada ao Ca.
3. A adição contínua de esterco no solo provocou a migração das frações de P orgânico da camada de 0-20 para a de 40 – 60 cm.

AGRADECIMENTOS

Aos funcionários do Laboratório de Fertilidade de Solos do grupo de Radioagronomia pela ajuda nas análises e ao Inter-American Institute for Global Change (IAI) e CNPq pelo apoio financeiro. Aos agricultores responsáveis pelas áreas estudadas, por terem facilitado o trabalho de amostragem.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- AKHTAR, M.; McCALLISTER, D. L.; FRANCIS, D. D.; SCHEPERS, J. S. Manure source effects on soil phosphorus fractions and their distribution. *Soil Sci.*, 170:183-190, 2004.
- AJIBOYE, B.; AKINREMI, O. O.; RAEZ, G. J. Laboratory characterization of phosphorus in fresh and oven-dried organic amendments. *J. Environ. Qual.*, 33:1062-1069, 2004.
- ANDERSON, B. H. & MAGDOFF, F. R. Relative movement and soil fixation of soluble organic and inorganic phosphorus. *J. Environ. Qual.*, 34:2228-2233, 2005.
- 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*, 17:397-403, 1993.
- ARAÚJO, M. S. B.; SCHAEFER, C. E. R.; SAMPAIO, E. V. S. B. Plant phosphorus availability in latosols and luvisols from northeastern semi-arid Brazil. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 34:407-425, 2003.
- ARAÚJO, M. S. B.; SCHAEFER, C. E. R.; SAMPAIO, E. V. S. B. Frações de fósforo após extrações sucessivas com resina e incubação, em Latossolos e Luvisolos do semi-árido de Pernambuco. *R. Bras. Ci. Solo*, 28:259-268, 2004.
- BALL-COELHO, B.; SALCEDO, I. H.; TIESSEN, H.; STEWART, W. B. Short- and long-term phosphorus dynamics in a fertilized ultisol under sugarcane. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57:1027:1034, 1993.
- CASSOL, P. C.; GIANELLO, C.; COSTA, V. E. U. Frações de fósforo em estrumes e sua eficiência como adubo fosfatado. *R. Bras. Ci. Solo*, 25:635-644, 2001.
- DJODJIC, F.; BÖRLING, K.; BERGSTRÖM, L. Phosphorus leaching in relation to soil type and soil phosphorus content. *J. Environ. Qual.*, 33:678-684, 2004.
- DOU, Z.; TOTH, J. D.; GALLIGAN, D. T.; Jr RAMBERG, C. F.; FERGUSON, J. D. Laboratory procedures for characterizing manure phosphorus. *J. Environ. Qual.*, 29:508-514, 2000.
- EGHBALL, B. Soil properties as influenced by phosphorus – and nitrogen – based manure and compost applications. *Agron. J.*, 94:128-135, 2002.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília, Serviço de Produção de Informação. 1999. 412p.
- GALVÃO, S. R. S.; SALCEDO, I. H.; OLIVEIRA, F. F. Acumulação de nutrientes em solos arenosos adubados com esterco bovino. *Pesq. Agropec. Bras.*, 43:99-105, 2008.

GRAETZ, D. A. & NAIR, V. D. Fate of phosphorus in Florida spodosols contaminated with cattle manure. *Ecol. Eng.*, 5:163-181, 1995.

HAO, X.; GODLINSKI, F.; CHANG, C. Distribution of phosphorus forms in soil following long-term continuous and discontinuous cattle manure applications. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 72:90-97, 2008.

HE, Z. & HONEYCUTT, C. W. Enzymatic characterization of organic phosphorus in animal manure. *J. Environ. Qual.*, 30:1685-1692, 2001.

HEDLEY, M. J.; STEWART, J. W. B.; CHAUHAN, B. S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 46:970-976, 1982.

HOUNTIN, J. A.; KARAN, A.; COUILLARD, D.; CESCAS, M. P. Use of a fractionation procedure to assess the potential for P movement in a soil profile after 14 years of liquid pig manure fertilization. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 78:77-84, 2000.

KLEINMAN, P.J.A.; WOLF, A.M.; SHARPLEY, A.N.; BEEGLE, D.B.; SAPORITO, L.S. Survey of water extractable phosphorus in manures. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 69:701-708, 2005.

KOOPMANS, G. F.; CHARDON, W. J.; McDOWELL, R. W. Phosphorus movement and speciation in a sandy soil profile after long-term animal manure applications. *J. Environ. Qual.*, 36:305-315, 2007.

LEHMANN, J. Z.; LAN, Z.; HYLAND, C.; SATO, S.; SOLOMON, D.; KETTERINGS, Q. M. Long-term dynamics of phosphorus forms and retention in manure-amended soils. *Environ. Sci. Technol.*, 39:6672-6680, 2005.

LINDSAY, W. L. *Chemical equilibria in soils*. 1 Ed. New York, Ed. John Wiley & Sons, 1979. 449p.

MENEZES, R. S. C. & SALCEDO, I. H. Mineralização de N após incorporação de adubos orgânicos em um Neossolo Regolítico cultivado com milho. *Rev. Bras. Eng. Agric. Amb.*, 11:361-367, 2007.

MENEZES, R. S. C. & OLIVEIRA, T. S. Mudanças na fertilidade de um neossolo regolítico após seis anos de adubação orgânica. *Rev. Bras. Eng. Agric. Amb.*, 12:251-257, 2008.

MURPHY, J. & RILEY, J. P. A. A modified simple solution method for the determination of phosphates in natural waters. *Anal. Chim. Acta*, 27:31-36, 1962.

OHNO, T. & ZIBILSKA, L. M. Determination of low concentrations of phosphorus in soil extracts using malachite green. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55:892-895, 1991.

R Development Core Team. R: A language and Environment for Statistical Computing. R. Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2008. disponível em: <url: <http://www.R-project.org>>. Acesso em 03 de março de 2008.

SABOURIN, E.; SILVEIRA, L. M.; TONNEAU, J. P.; SIDERSKY, P. Fertilidade e agricultura familiar no Agreste Paraibano: um estudo sobre o manejo da biomassa. Esperança-PB: CIRAD-TERRA/ASPTA, 2000. 59p.

SALCEDO, I. H. Biogeoquímica do fósforo em solos da região semi-árida do NE do Brasil. R. Geo., 23:108-123, 2006.

SCHABENBERGER, O. & PIERCE, F.J. Contemporary Statistical Models for the Plant and Soil Sciences. CRC Press. Boca Raton, 2002, 925 p.

SHARPLEY, A. N. & MOYER, B. Phosphorus forms in manure and composts and their release during simulated rainfall. J. Environ. Qual., 29:1462-1469, 2000.

SHARPLEY, A. N.; McDOWELL, R. W.; KLEINMAM, P. J. A. Amounts, forms, and solubility of phosphorus in soils receiving manure. Soil Sci. Soc. Am. J., 68:2048-2057, 2004.

SIDDIQUE, M. T. & ROBINSON, J. S. Differences in phosphorus retention and release in soils amended with animal manures and sewage sludge. Soil Sci. Soc. Am. J., 68:1421-1428, 2004.

SILVA, T. O.; MENEZES, R. S. C.; TIESSEN, H.; SAMPAIO, E. V. S. B.; SALCEDO, I. H.; SILVEIRA, L. M. Adubação orgânica da batata com esterco e/ou *Crotalaria juncea*. I - Produtividade vegetal e estoque de nutrientes no solo em longo prazo. R. Bras. Ci. Solo, 31:39-49, 2007.

SILVEIRA, M. M. L. Fracionamento seqüencial de fósforo em solos do semi-árido nordestino. Dissertação. Curso de Mestrado em Ciência do Solo, UFRPE, Recife-PE, 2000, 61p.

SILVEIRA, M. M. L.; ARAÚJO, M. S. B.; SAMPAIO, E. V. S. B. Distribuição de fósforo em diferentes ordens de solo do semi-árido da Paraíba e de Pernambuco. R. Bras. Ci. Solo, 30:281-291, 2006.

SUE, J.; WANG, H.; KIMBERLEY, M. O.; BEECROFT, K.; MAGESAN, G. N.; HU, C. Fractionation and mobility of phosphorus in a sandy soil amended biosolids. Env. Sci. Pollut. Res. 14:529-535, 2007.

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., 38:139-151. 1992.

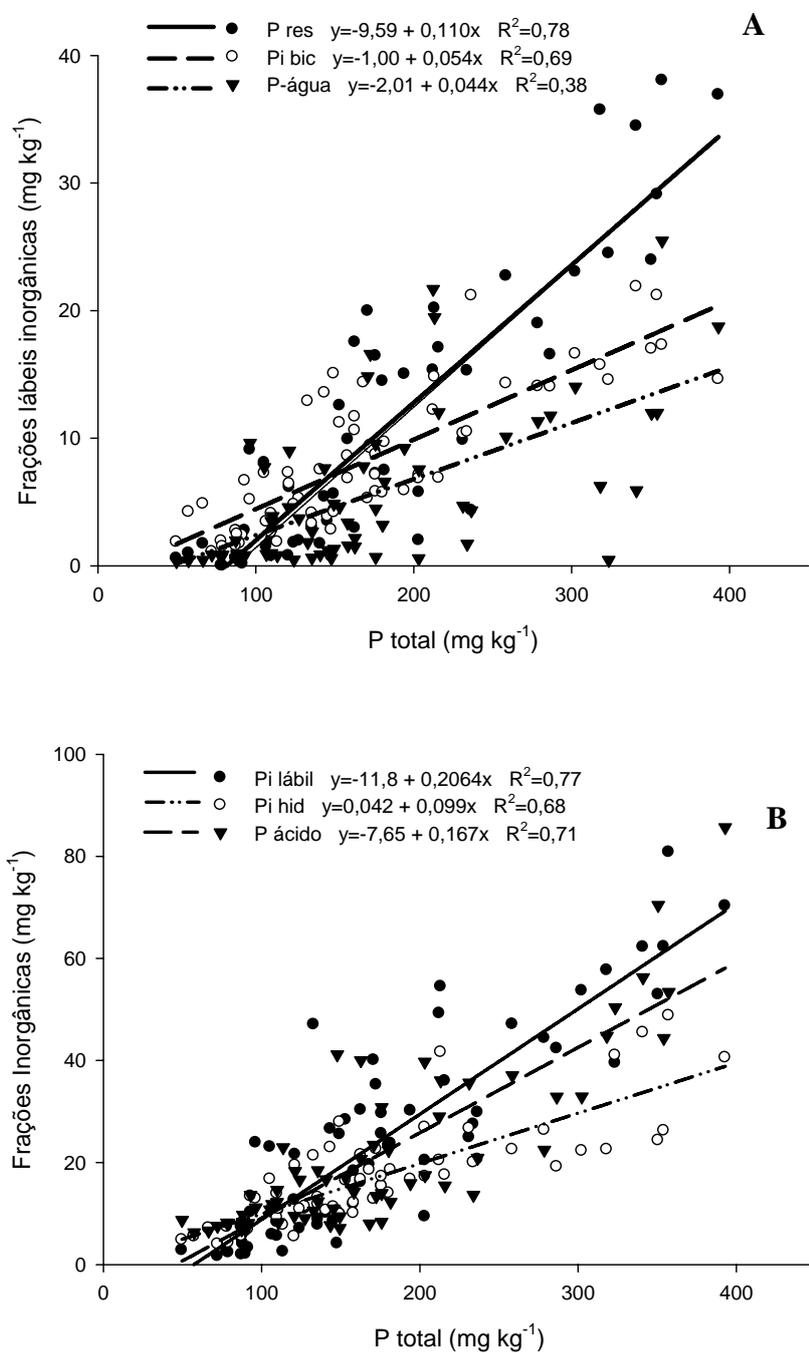


Figura 1. Relação entre frações l\u00e1beis inorg\u00e2nicas e P total (A) e entre fra\u00e7\u00f5es inorg\u00e2nicas e P total (B), em amostras de solo de tr\u00eas profundidades (n=66).

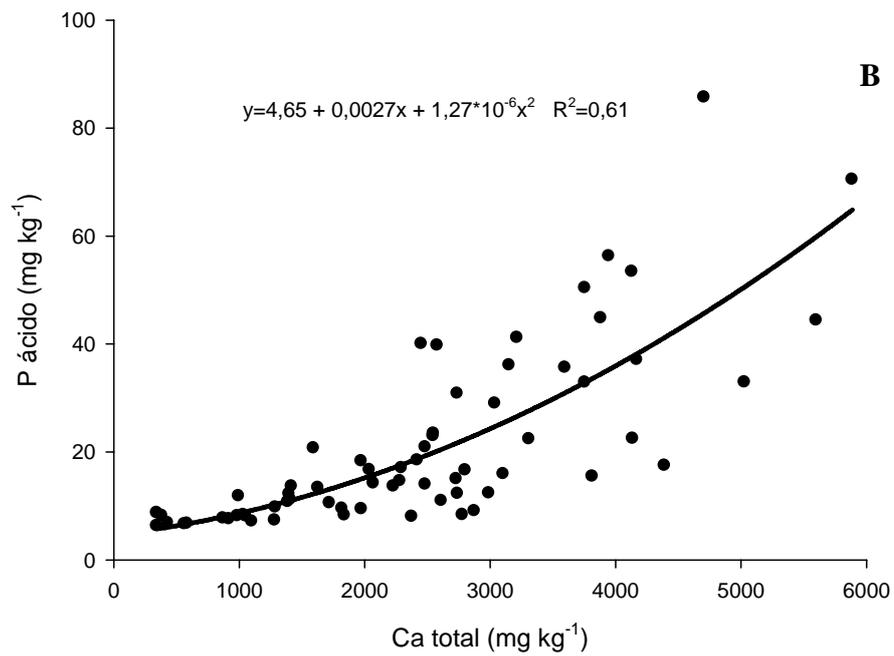
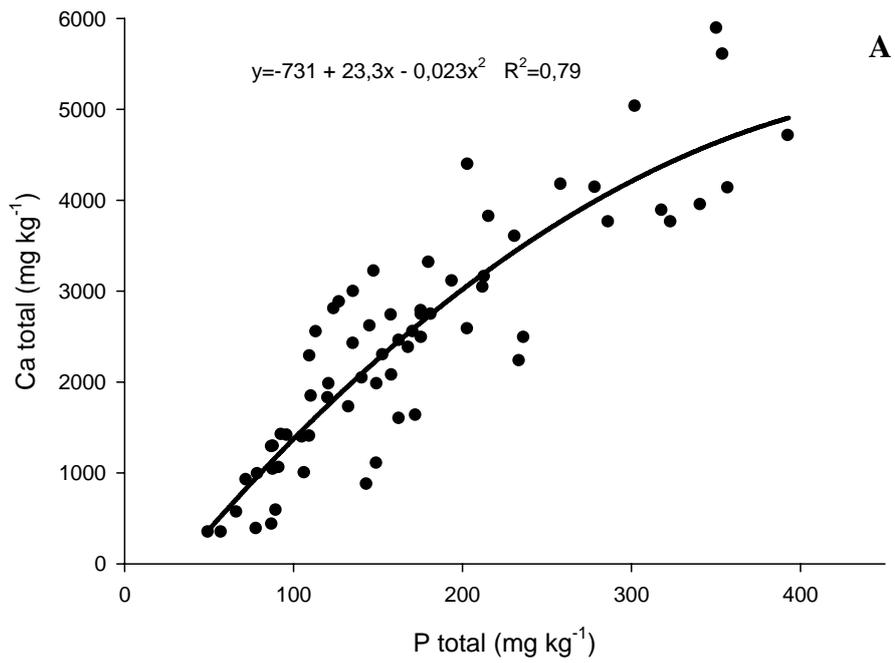


Figura 2. Relação entre o Ca total e o P total (A) e entre P extraível por ácido e Ca total (B), em amostras de solo de três profundidades (n=66).

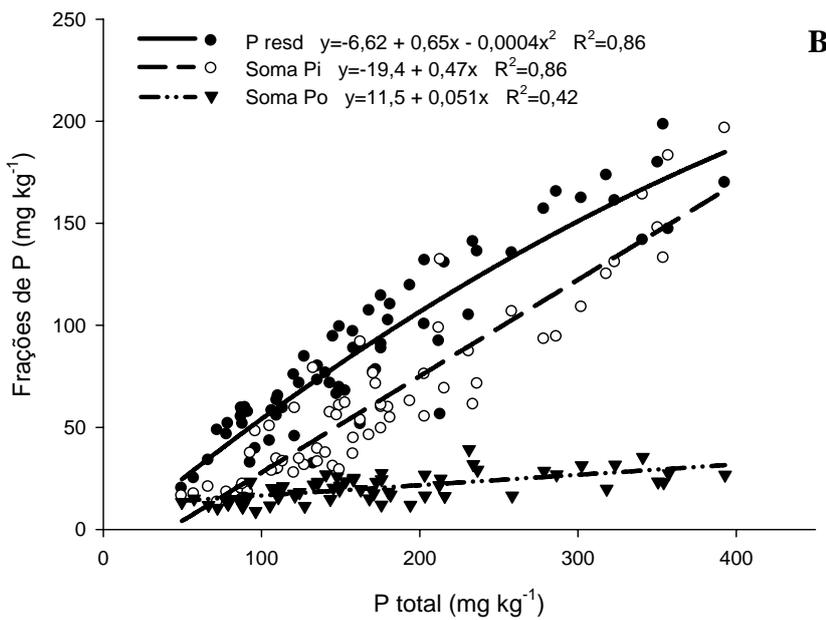
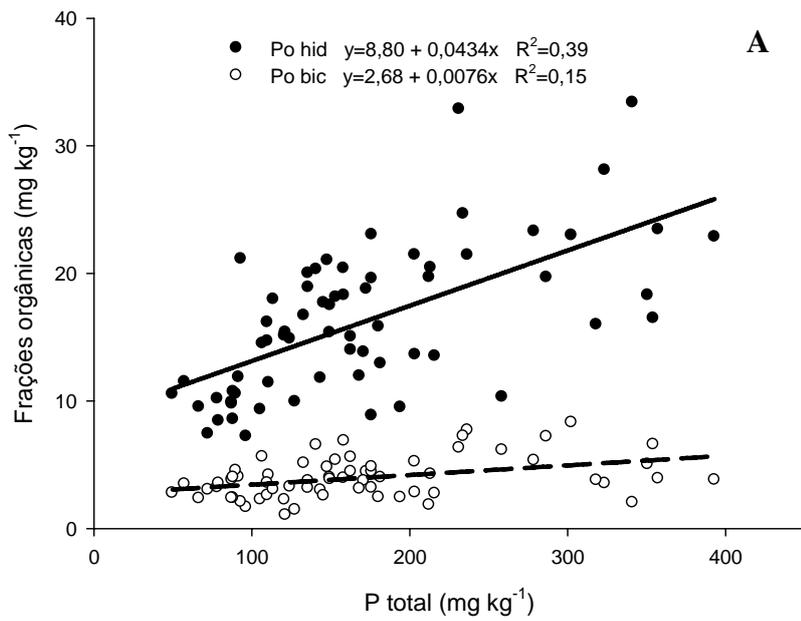


Figura 3. Relação entre as frações orgânicas de P e o P total (A) e entre a fração residual, a soma das frações inorgânicas e a soma das frações orgânicas e o P total (B), em amostras de solo de três profundidades (n=66).

Quadro 1. Teor médio, mínimo, máximo e desvio padrão de P total e extraível com Mehlich-1, resina, água, H₂SO₄ 1 mol L⁻¹ e NaOH 0,1 mol L⁻¹, e de Ca e Fe totais, em amostras de esterco bovino (n=09) coletadas em nove propriedades do município de Esperança/PB

Nutriente	Média	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão
P total (g kg ⁻¹)	2,95	1,50	6,24	1,67
P Mehlich-1 (g kg ⁻¹)	2,31	1,06	5,19	1,42
P resina (g kg ⁻¹)	1,05	0,53	1,89	0,47
P água (g kg ⁻¹)	1,05	0,19	2,69	0,84
P H ₂ SO ₄ 1 mol L ⁻¹ (g kg ⁻¹)	2,10	1,00	4,25	1,11
Pi NaOH 0,1 mol L ⁻¹ (g kg ⁻¹)	0,39	0,11	1,19	0,35
Po NaOH 0,1 mol L ⁻¹ (g kg ⁻¹)	1,02	0,55	1,70	0,47
Ca total (g kg ⁻¹)	14,0	6,20	25,5	6,34
Fe total (g kg ⁻¹)	2,22	0,69	5,86	1,32

Quadro 2. Proporção média das frações de P em amostras de solo agrupadas em quatro faixas pelo teor de P total na camada de 0-20 cm

Camada cm	Frações Inorgânicas					Frações orgânicas		P _{resd}	P _t
	P _w	P _{res}	P _{bic}	P _{hid}	P _{ácido}	P _{bic}	P _{hid}		
	----- % -----					-----			mg kg ⁻¹
Faixa 1 (< 110 mg kg ⁻¹)									
0 - 20	1,44	1,02	4,11	10,6	10,6	3,82	13,6	54,9	86
20 - 40	0,87	0,77	3,60	8,12	8,10	5,22	14,0	57,0	83
40 - 60	0,84	0,03	2,40	7,31	7,30	4,65	13,9	59,6	75
Faixa 2 (110 - 220 mg kg ⁻¹)									
0 - 20	5,49	5,84	4,13	9,20	10,0	1,71	8,20	55,3	184
20 - 40	4,44	3,25	4,84	10,1	10,9	2,30	10,8	53,3	134
40 - 60	2,41	2,22	5,01	11,0	10,3	2,35	12,4	54,4	118
Faixa 3 (220 - 330 mg kg ⁻¹)									
0 - 20	3,75	6,65	5,14	8,82	12,0	2,50	8,20	53,1	271
20 - 40	1,58	6,44	5,33	9,83	13,5	2,49	10,6	50,3	178
40 - 60	0,83	6,34	5,77	9,83	10,4	3,43	11,8	51,5	142
Faixa 4 (330 - 440 mg kg ⁻¹)									
0 - 20	3,33	8,63	5,20	9,50	17,8	1,21	6,40	48,0	360
20 - 40	3,06	9,41	5,40	11,0	13,9	1,72	8,03	47,4	288
40 - 60	2,78	5,81	4,80	12,2	12,8	3,00	10,6	48,0	202

Quadro 3. Estimativas dos contrastes ortogonais para as percentagens de P em cada fração relativa ao P total, na comparação entre duas camadas de solos contíguas

Contrastes	Frações Inorgânicas				Frações orgânicas			P _{resd}
	P _w	P _{res}	P _{bic}	P _{hid}	P _{ácido}	P _{bic}	P _{hid}	
	----- % -----							
0-20 vs 20-40 cm	1,02 ^{***}	0,60 ^{ns}	-0,17 ^{ns}	-0,25 ^{ns}	0,54 ^{ns}	-0,62 ^{***}	-1,77 ^{**}	0,70 ^{ns}
20-40 vs 40-60 cm	0,77 ^{**}	1,35 ^{ns}	0,29 ^{ns}	-0,34 ^{ns}	0,88 ^{ns}	-0,43 ^{**}	-1,31 [*]	-1,24 ^{ns}

***, **, * e ns: significativo à 1, 5 e 10% e não significativo, respectivamente.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação de esterco proporciona um acréscimo de nutrientes às plantas e uma maior adição de compostos fosfatados inorgânicos que orgânicos. Este acréscimo de nutrientes tende a aumentar a produtividade das culturas mercantis (batatinha e erva-doce) da região Agreste da Paraíba. Entretanto, o acúmulo de nutrientes em quantidades acima da exigida pela cultura da batatinha e a baixa capacidade de sorção de P dos solos arenosos resultam numa utilização pouco eficiente do esterco, insumo por vezes escasso na região, e com alto potencial poluidor do lençol freático. Estudos no Brasil sobre a migração de nutrientes, principalmente P e N, no solo e contaminação dos lençóis freáticos, rios e lagos ainda é muito restrito. Os resultados existentes indicam a necessidade premente de estudos visando otimizar as doses utilizadas assim como também avaliar o efeito residual dos nutrientes aportados por esse insumo. O uso combinado de esterco e adubos verdes pode ser uma alternativa de manejo para a adubação em solos arenosos para agricultores de baixa renda, pelo sincronismo na liberação de nutrientes para as culturas. Este manejo pode ser feito em anos alternados. Alguns agricultores ficam temerosos em mudar seu manejo do solo, pela falta de garantia em caso de perda da produtividade e pelo seu pouco conhecimento científico, entretanto um número significativo de agricultores já vem mudando a forma tradicional de manejo do solo, que vem de seus antepassados, permitindo a inclusão de novas técnicas de manejo, que tende a melhorar a produtividade e ajuda a manter a sustentabilidade do solo.