

# PERDA DE ÁGUA, SOLO E FÓSFORO COM APLICAÇÃO DE DEJETO LÍQUIDO BOVINO EM LATOSSOLO SOB PLANTIO DIRETO E COM CHUVA SIMULADA<sup>(1)</sup>

Hélio Fumiaki Mori<sup>(2)</sup>, Nerilde Favaretto<sup>(3)</sup>, Volnei Pauletti<sup>(3)</sup>,  
Jeferson Dieckow<sup>(3)</sup> & Wesley Leandro dos Santos<sup>(4)</sup>

## RESUMO

A região dos Campos Gerais do Paraná é importante produtora de leite em sistema confinado e, com isso, também geradora de dejetos líquidos bovinos. Os objetivos deste trabalho foram avaliar perdas de água, solo, P total, P solúvel e P particulado em chuva simulada, realizada imediatamente após a aplicação das doses de 0, 30, 60 e 90 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> de dejetos líquidos bovinos, em um Latossolo Vermelho-Amarelo manejado em plantio direto, e inferir os eventuais impactos na qualidade da água. A aplicação de dejetos aumentou a taxa de perda de água por escoamento superficial em mais de 10 vezes, em todos os intervalos de 15 min da chuva durante duas horas. O maior incremento na perda total de água ocorreu com as doses 0 e 30 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>. A partir da dose de 60 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, houve tendência de estabilização da perda de água. A taxa de perda de solo nos primeiros 15 min de chuva também aumentou com a aplicação de dejetos, repetindo-se, embora não de forma significativa, até o final da chuva. O maior incremento na perda de solo também ocorreu com a aplicação das doses de 0 e 30 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, seguido por estabilização com as doses maiores. Parte do material sólido perdido veio do próprio dejetos. A aplicação de dejetos, mesmo na dose de 30 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, elevou a concentração de P total, solúvel e particulado no escoamento para valores acima dos níveis críticos relacionados com a eutrofização, especialmente nos primeiros 15 min de chuva. Por aumentar a taxa de escoamento de água e a concentração de P no escoamento,

---

<sup>(1)</sup> Parte da Dissertação de Mestrado do primeiro autor apresentada ao Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal do Paraná – UFPR. Recebido para publicação em julho de 2008 e aprovado em janeiro de 2009.

<sup>(2)</sup> Engenheiro-Agrônomo, Mestre em Ciência do Solo. Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Paraná – UFPR. Rua dos Funcionários 1540, CEP 80035-050 Curitiba (PR). E-mail: morioshima@hotmail.com

<sup>(3)</sup> Professor Adjunto do Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, UFPR. E-mails: nfavaretto@ufpr.br; jefersondieckow@ufpr.br; vpauletti@ufpr.br

<sup>(4)</sup> Acadêmico do Curso de Agronomia, UFPR. Bolsista PIBIC/CNPq. E-mail: wesley5665@hotmail.com

o dejetto também aumentou a perda absoluta das três formas de P, com tendência de estabilização a partir de  $60 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ . A causa do aumento substancial tanto das taxas como da quantidade absoluta de perda de água, solo e P por escoamento foi possivelmente o selamento superficial do solo promovido pelo próprio dejetto e pelo fato de a chuva ter ocorrido imediatamente após a aplicação deste.

**Termos de indexação:** adubação orgânica, qualidade da água, escoamento superficial, eutrofização.

**SUMMARY: WATER, SOIL AND PHOSPHORUS LOSS AFTER CATTLE SLURRY APPLICATION TO OXISOL UNDER NO-TILLAGE AND SIMULATED RAINFALL**

*Campos Gerais in the State of Paraná (Brazil) is an important region of milk production and consequently of cattle slurry. The purposes of this study were: (a) to evaluate losses of water, soil, total P, soluble P and particulate P under simulated rainfall performed immediately after the application of 0, 30, 60 and  $90 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  cattle slurry on a Red-Yellow Latossol (Ferralsol) under no-tillage system, and (b) to discuss the possible impacts on water quality. Slurry application increased the surface runoff rate by more than 10 times in all 15 min intervals of the 2 h rainfall. The increase of total runoff was highest between 0 and  $30 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , and tended to stabilize at over  $60 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ . The soil loss rate in the first 15 min of rainfall also increased with slurry application, and this tendency continued until the end of the 2 h rainfall, although not significantly. The highest increase of total soil loss was also observed between 0 and  $30 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , tending to stabilization at the highest slurry dose. Part of the solid runoff was derived from the applied slurry. The application, even at only  $30 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  slurry, increased the total, soluble and particulate P concentration in the runoff to over the limit values regarding eutrophication, especially in the first 15 min of rainfall. Besides the increased runoff rate and P concentration, the slurry application also caused higher absolute losses of the three P forms, which tended to stabilize from  $60 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  onwards. The increase in runoff and soil and P loss rates were possibly due to soil surface sealing caused by slurry particles and is possibly related to the fact that rainfall was simulated immediately after slurry application.*

*Index terms:* organic manure, water quality, runoff, eutrophication.

## INTRODUÇÃO

A região dos Campos Gerais do Paraná – uma das pioneiras na adoção do plantio direto no Brasil – é também uma importante bacia leiteira no Estado, com produção baseada principalmente no sistema confinado (*free-stall*). Uma importante discussão refere-se ao destino do dejetto líquido gerado nesses sistemas confinados de produção de leite. A maior parte do dejetto é aplicada em áreas de lavoura sob plantio direto, melhorando os níveis de fertilidade do solo e possibilitando a redução de custos com fertilizantes químicos. Por outro lado, o dejetto aplicado no solo é uma importante fonte de P, que pode ser transportado pelo escoamento superficial até corpos hídricos e causar problemas de eutrofização (Hooda et al., 2000; Shigaki et al., 2006), sobretudo quando não há critério relacionado a doses, épocas e formas de aplicação do

dejetto diante de variações de regime pluviométrico, tipo de solo, topografia, uso e manejo do solo, práticas conservacionistas e distância até o manancial.

O não-revolvimento do solo, exceto numa pequena faixa para a semeadura, associado à manutenção da cobertura superficial de palha são fatores fundamentais do plantio direto no sentido de minimizar a ação erosiva da chuva e enxurrada (Derpsch et al., 1991). Contudo, em algumas situações de plantio direto, especialmente naquelas em que há compactação da camada superficial do solo em decorrência de tráfego de máquinas e, ou, pisoteio animal, a taxa de infiltração de água pode diminuir consideravelmente (Camara & Klein, 2005), aumentando, por conseguinte, a perda de água (Levien et al., 1990) e a concentração de elementos como N e P em corpos hídricos, sem haver necessariamente perda significativa de sedimento.

Fósforo e N estão envolvidos diretamente no processo de eutrofização, sendo o P considerado limitante na maioria dos ambientes aquáticos, pois o N pode ser fixado simbioticamente por algas a partir do  $N_2$  atmosférico (Correll, 1998; Daniel et al., 1998). Nesse sentido, as estratégias de controle da eutrofização têm sido focadas no controle das fontes de P no solo e do seu transporte a partir dessas fontes até os corpos de água (Sharpley et al., 1994, 2000, 2001). A perda de P via escoamento superficial ocorre na forma de P particulado, ligado a partículas orgânicas ou minerais, e de P solúvel na água do escoamento superficial (Haygarth & Sharpley, 2000). O P solúvel, junto a uma fração variável do P particulado, constitui o P biodisponível, a forma mais crítica em termos de eutrofização, por ser potencialmente disponível à absorção por algas no curto prazo (Sharpley et al., 1992). No longo prazo, o P particulado representa um reservatório disponível para o crescimento e desenvolvimento de plantas aquáticas (Sharpley et al., 1994).

A aplicação de dejetos animais geralmente promove e aumenta, como efeito de curto prazo, a perda de P por escoamento superficial (Smith et al., 2001; Bertol, 2005; Peles, 2007; Allen & Mallarino, 2008), e isso pode estar associado à formação de um selo constituído pelo próprio dejetos sobre a superfície do solo (Bundy et al., 2001) e ao consequente aumento do escoamento superficial (Bertol et al., 2007; Peles, 2007). Aplicações sucessivas de dejetos de animais na mesma área, por serem normalmente realizadas de acordo com a necessidade de N para os cultivos agrícolas, têm resultado na elevação excessiva do teor de P no solo e, consequentemente na concentração de P no escoamento superficial (Pote et al., 1999). Nesse sentido, e visando mitigar os problemas de eutrofização, melhores práticas de manejo da adubação orgânica intensiva têm sido adotadas em vários países (Hooda et al., 2000; Sharpley et al., 2001; Shigaki et al., 2006). Por outro lado, como efeito de longo prazo, é possível que o dejetos aplicado melhore as qualidades estruturais do solo e proporcione maiores taxas de infiltração, menores taxas de escoamento e menores perdas de água, solo e P (Bundy et al., 2001; Smith et al., 2001).

Os objetivos deste trabalho foram avaliar, como efeito de curto prazo, perdas de água, solo, P total, P solúvel e P particulado em condição de chuva simulada, realizada imediatamente após a aplicação de doses de dejetos líquido bovino, numa área manejada em plantio direto na região dos Campos Gerais do Paraná e, a partir disso, inferir os eventuais impactos na qualidade da água.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Experimento de campo

O trabalho de campo foi realizado em setembro de 2006, no Centro de Experimentação da Fundação ABC

para Assistência e Divulgação Técnica Agropecuária, situado no município de Ponta Grossa, na região dos Campos Gerais do Paraná, de coordenadas geográficas  $25^{\circ} 00' 35'' S$  e  $50^{\circ} 09' 16'' E$  e altitude de 890 m, com clima subtropical úmido, do tipo Cfb, de acordo com a classificação de Köppen. O solo é classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo (Embrapa/Fundação ABC, 2001), com os seguintes atributos na camada de 0–20 cm: 228 g  $kg^{-1}$  de argila; 33 g  $kg^{-1}$  de silte; 739 g  $kg^{-1}$  de areia; densidade do solo de 1,5  $kg\ dm^{-3}$ ; diâmetro médio ponderado de agregados de 1,33 mm; condutividade hidráulica saturada de 47  $mm\ h^{-1}$ ; microporosidade de 28 % e macroporosidade de 15 %; pH  $CaCl_2$  de 5,1; 0  $cmol_c$  de  $Al^{3+}$   $dm^{-3}$ ; 3,5  $cmol_c$  de  $H + Al$   $dm^{-3}$ ; 3,7  $cmol_c$   $dm^{-3}$  de  $Ca^{2+}$ ; 0,7  $cmol_c$   $dm^{-3}$  de  $Mg^{2+}$ ; 0,17  $cmol_c$   $dm^{-3}$  de K; 19,0  $mg\ dm^{-3}$  de P (Mehlich-1); 14,4  $mg\ dm^{-3}$  de  $N-NH_4^+$  e 17,0  $mg\ dm^{-3}$  de  $N-NO_3^-$  extraídos em KCl 2  $mol\ L^{-1}$ ; e 13,2  $g\ dm^{-3}$  de C.

O experimento foi instalado numa gleba com declividade de 15 % que vinha sendo manejada em plantio direto por mais de 10 anos, num sistema de rotação de culturas envolvendo soja e milho no verão e trigo e aveia-preta no inverno, adubado exclusivamente com fertilizantes minerais, de acordo com as necessidades das culturas. Por ocasião da instalação do experimento, a cobertura do solo consistia de resíduo de aveia-preta (*Avena strigosa* Schreb.) recém-rolada (no mesmo dia) e dessecada 10 dias antes.

Os tratamentos consistiram de quatro doses de dejetos líquido bovino (0, 30, 60 e 90  $m^3\ ha^{-1}$ ), distribuídos no delineamento experimental de blocos casualizados, com três repetições. As parcelas com dimensões laterais de  $1,0 \times 1,0$  m foram delimitadas por chapas de metal zincado, introduzidas a 5 cm no solo e com uma borda de 5 cm acima da superfície do solo. A distância entre as parcelas foi de 5,0 m no sentido do declive e 4,0 m no sentido perpendicular ao declive. Uma calha coletora do escoamento superficial foi instalada na extremidade a jusante da parcela, a partir da qual o escoamento era canalizado para um recipiente plástico de 20 L, acomodado numa trincheira de dimensões apropriadas para tal recipiente.

A aplicação do dejetos líquido bovino sobre a aveia-preta dessecada e rolada foi realizada de forma individualizada para cada parcela, com o auxílio de uma proveta onde o volume de dejetos havia sido medido. Como a dose de 90  $m^3\ ha^{-1}$  de dejetos equivale, aproximadamente, a uma lâmina de 9 mm, uma aplicação de 9, 6 e 3 mm de água deionizada foi feita antes da aplicação das doses de 0, 30 e 60  $m^3\ ha^{-1}$ , respectivamente, a fim de uniformizar a umidade do solo. Imediatamente após a aplicação do dejetos na parcela, aplicou-se a chuva simulada. Ao final desta e após a mudança do simulador, esses procedimentos foram realizados na parcela subsequente. Com isso, o trabalho de campo levou quatro dias para ser

concluído. As condições meteorológicas nesse período foram de tempo seco e frio. O dejetos veio de uma fazenda produtora de leite das imediações, e alguns de seus atributos físicos e químicos foram caracterizados (Quadro 1).

### Chuva simulada

A chuva simulada foi realizada com o emprego de um simulador programável (Meyer & McCune, 1958; Neibling et al., 1981), equipado com um bico 80100 Veejet, disposto de forma centralizada na parcela, a uma altura de 2,4 m. Utilizou-se água deionizada de um reservatório de 1.000 L. Para evitar a influência do vento na chuva, a estrutura de suporte do simulador foi envolta em lona plástica. As chuvas foram realizadas individualmente sobre cada parcela e tinham duração de 120 min ininterruptos, com intensidade de 60 mm h<sup>-1</sup> nos primeiros 60 min (primeira hora) e 85 mm h<sup>-1</sup> entre 60 e 120 min (segunda hora), com uma precipitação total de 145 mm.

O período de chuva foi dividido em oito intervalos de 15 min. No final de cada intervalo, o volume de escoamento era medido com proveta graduada, homogeneizado e amostrado mediante a retirada de uma alíquota de 300 mL. Essas amostras eram acondicionadas em recipientes plásticos e congeladas até o momento das análises laboratoriais. Com base nos volumes de escoamento medidos em cada intervalo,

**Quadro 1. Características do dejetos líquido de bovino empregado no experimento em Latossolo, sob plantio direto e chuva simulada com duas horas de duração**

Característica	Base úmida	Base seca
Matéria seca	33,8 g L <sup>-1</sup>	-
pH	7,9	-
Condutividade elétrica	34,5 dS m <sup>-1</sup>	-
Carbono orgânico total <sup>(1)</sup>	12,13 g L <sup>-1</sup>	359 g kg <sup>-1</sup>
Nitrogênio total <sup>(1)</sup>	0,87 g L <sup>-1</sup>	25,8 g kg <sup>-1</sup>
Relação C:N	13,9	13,9
Fósforo Total <sup>(2)</sup>	0,55 g L <sup>-1</sup>	16,2 g kg <sup>-1</sup>
Solúvel <sup>(3)</sup>	0,23 g L <sup>-1</sup>	6,8 g kg <sup>-1</sup>
Particulado <sup>(4)</sup>	0,32 g L <sup>-1</sup>	9,4 g kg <sup>-1</sup>
Solubilidade	42 %	42 %
Potássio total <sup>(2)</sup>	1,07 g L <sup>-1</sup>	31,7 g kg <sup>-1</sup>

<sup>(1)</sup> Determinado em base seca, pelo método de combustão seca, em analisador CN Vario EL. A concentração em base úmida foi obtida por cálculo, levando-se em consideração o teor de matéria seca de 33,8 g L<sup>-1</sup>. <sup>(2)</sup> Determinado em base seca, pelo método de digestão seca (Martins & Reissmann, 2007). A concentração em base úmida foi obtida por cálculo, levando-se em consideração o teor de matéria seca de 33,8 g L<sup>-1</sup>. <sup>(3)</sup> Determinado em base úmida, após filtragem do dejetos em filtro com abertura de 0,45 µm (APHA, 1995). <sup>(4)</sup> Calculado pela diferença entre o teor total e o solúvel.

calculou-se a respectiva taxa de perda de água, dividindo-se o volume pelo tempo (Lal, 1994).

### Análises laboratoriais

Para a determinação da concentração de solo perdido, uma alíquota de 30 mL de escoamento foi seca em estufa a 105 °C, para posterior pesagem dos sólidos totais.

Análises foram realizadas para o P na forma total e solúvel e, pela diferença entre ambos, determinou-se a forma particulada. A concentração de P total no escoamento foi feita a partir de digestão sulfúrica (digestão Kjeldahl). De acordo com APHA (1995), a digestão Kjeldahl é recomendada para o N total, porém, internacionalmente, tem sido utilizada também para o P total (Pote & Daniel, 2000).

A uma alíquota de 20 mL do escoamento foram adicionados 10 mL de solução digestora (ácido sulfúrico, sulfato de potássio e catalisador cúprico). A digestão iniciou-se com a temperatura de 100 °C, aumentada 50 °C a cada 30 min até atingir temperatura final de 380 °C, mantida por mais 30 min. A determinação propriamente dita da concentração de P total foi feita de acordo com o método do ácido ascórbico (APHA, 1995). A uma alíquota de 5,0 mL de amostra digerida adicionou-se 0,8 mL de solução da mistura (molibdato de amônio, tartarato de potássio e antimônio, ácido sulfúrico e ácido ascórbico). As leituras foram efetuadas em espectrofotômetro ajustado para comprimento de onda de 880 nm.

Para determinação de P solúvel, 50 mL do escoamento foram passados em filtro com abertura de 0,45 µm. Uma alíquota de 5,0 mL da solução passada no filtro foi empregada para a análise, utilizando-se o mesmo método do ácido ascórbico usado na determinação de P total.

As perdas de solo e nutrientes foram calculadas multiplicando-se a concentração pelo volume de escoamento. Como as amostras foram coletadas a cada 15 min, calculou-se a taxa dividindo-se a perda pelo tempo de coleta. A perda acumulada foi calculada pela adição da taxa de cada coleta.

### Análises estatísticas

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), conforme o delineamento experimental de blocos casualizados. Os resultados de taxa de perda de água, solo, P total, P solúvel e P particulado ao longo do tempo foram submetidos à comparação de médias por meio do teste de Tukey (p < 0,10). Os dados de perda total de água, solo, P total, P solúvel e P particulado em função das doses de esterco foram ajustados a um modelo de crescimento exponencial com tendência ao máximo,  $y = y_0 + a(1 - e^{-bx})$  ou  $y = a(1 - e^{-bx})$ , por meio da ferramenta estatística do programa SigmaPlot for Windows (Systat Software, Inc.).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Perda de água por escoamento superficial

As taxas de escoamento superficial no tratamento sem aplicação de dejetos foram consideravelmente baixas, com valores médios de 1,5 e 3,7 mm h<sup>-1</sup> na primeira e segunda hora de chuva, respectivamente (Figura 1), resultando numa perda total de água de 5 mm, equivalente a 3,4 % dos 145 mm de precipitação pluvial total aplicados durante duas horas (Figura 2). Como o escoamento superficial é inversamente proporcional à infiltração de água no solo, os resultados obtidos comprovam a elevada capacidade de infiltração de água (96,6 %) nesse solo manejado sob plantio direto há mais de 10 anos num sistema relativamente diversificado de culturas. Um aspecto a ser destacado e que possivelmente contribuiu para essa reduzida taxa de escoamento é a textura franco-argilo-arenosa. Na camada de 0–20 cm, o solo apresenta 15 % de macroporosidade e condutividade hidráulica saturada de 47 mm h<sup>-1</sup>.

A aplicação de dejetos, no entanto, aumentou a taxa de escoamento mais de 10 vezes, observado com as doses de 0 e 30 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, nos oito intervalos de chuva

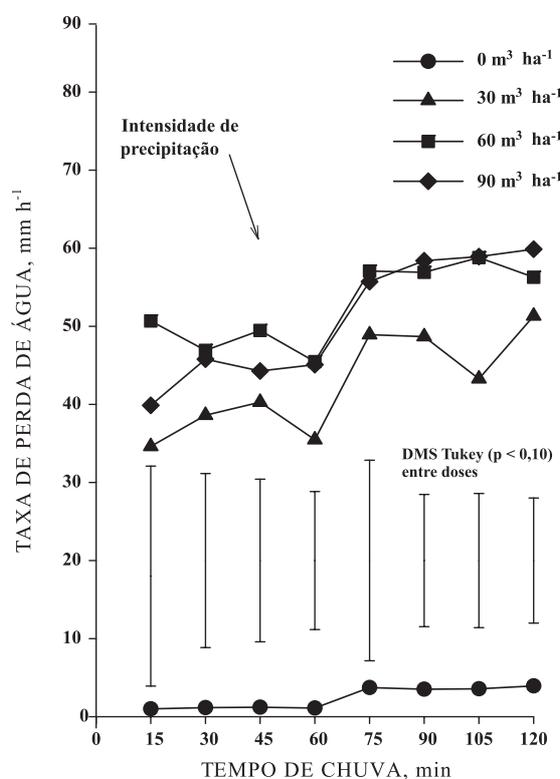


Figura 1. Taxa de perda de água por escoamento superficial após a aplicação das doses de 0, 30, 60 e 90 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> de dejetos líquidos de bovino em Latossolo, sob plantio direto e chuva simulada com duas horas de duração.

avaliados (Figura 1). Embora não diferindo significativamente, houve tendência de aumento da taxa de escoamento com o incremento da dose de dejetos de 30 para 60 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> em praticamente todos os intervalos de chuva (Figura 1). Com as doses de 60 e 90 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, as taxas de escoamento foram similares. Ao longo dos intervalos de chuva, houve tendência de aumento da taxa de escoamento com a aplicação de todas as doses. No entanto, esse incremento está claramente associado ao aumento da intensidade de precipitação pluvial de 60 para 85 mm h<sup>-1</sup>, ocorrido a partir dos 60 min.

O comportamento observado na taxa de escoamento superficial refletiu-se na perda total de água durante as duas horas de chuva. Os dados de perda de água em função das doses de dejetos foram ajustados a um modelo de crescimento exponencial com tendência ao máximo ( $R^2 = 0,996$ ,  $p < 0,001$ ) (Figura 2), que evidenciou claramente o maior incremento na perda de água com as doses de 0 e 30 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> e tendência de estabilização em torno de 100 mm, a partir da dose de 60 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>. A causa desse aumento substancial, tanto das taxas (Figura 1) como do volume total de perda de água por escoamento (Figura 2), em função da aplicação de dejetos, é, possivelmente, o efeito de selamento superficial promovido pelo próprio dejetos logo nos instantes iniciais da chuva. Dada a natureza particulada dos constituintes sólidos do dejetos, do tamanho de suas partículas e de a chuva ter se iniciado antes da secagem e subsequente aderência do dejetos sobre o resíduo superficial de aveia-preta, é provável que as partículas de dejetos tenham alcançado e se acomodado sobre a superfície do solo, de modo que obstruísem a abertura dos macro e microporos, como pode ter ocorrido com as partículas orgânicas em suspensão no dejetos. A obstrução de macroporos do solo por dejetos também foi a explicação usada por Bertol et al. (2007) ao observarem maior perda de água

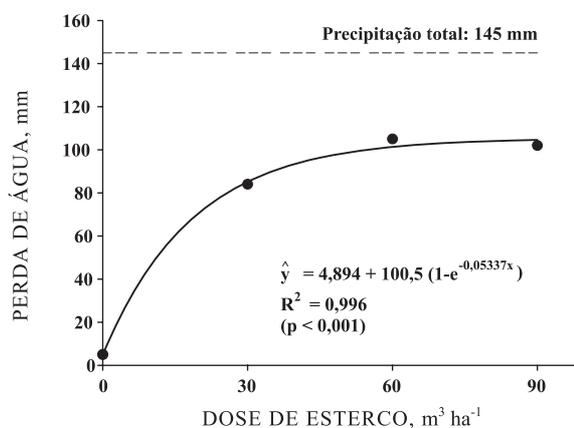


Figura 2. Perda acumulada de água por escoamento superficial após a aplicação das doses de 0, 30, 60 e 90 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> de dejetos líquidos de bovino em Latossolo, sob plantio direto e chuva simulada com duas horas de duração.

quando a adubação foi realizada com  $60 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  de dejetos líquidos de suíno, em comparação com a adubação mineral (NPK), em um estudo com chuva simulada sobre parcelas de  $1,00 \times 1,00 \text{ m}$  de Latossolo Vermelho no oeste do Paraná, utilizado com plantio direto. Em outro estudo realizado em pequenas parcelas em laboratório, sem cobertura superficial de resíduos, também ficou evidente a maior perda de água em função da aplicação de dejetos líquidos de suíno (Peles, 2007), explicada pela obstrução de macroporos superficiais do solo. Com base nos resultados deste estudo e dos realizados de Bertol et al. (2007), Peles (2007), Bundy et al. (2001) e Smith et al. (2001), há forte evidência de que o dejetos líquidos promove a obstrução de macroporos como uma ação mecânica, e com isso aumenta o potencial de perda de água por escoamento superficial, pelo menos quando a chuva ocorre imediatamente ou algumas horas após a aplicação do dejetos. O selamento superficial pode também ter sido influenciado pela possível dispersão das argilas em razão do elevado teor de Na no dejetos.

Outra hipótese levantada para explicar o maior escoamento e a menor infiltração de água em função da aplicação de dejetos líquidos é o suposto efeito hidrofóbico deste, que promove a repelência da água (Haynes & Swift, 1990; Bertol et al., 2007). No entanto, para obter evidências mais concretas da importância desse efeito hidrofóbico do dejetos, investigações mais profundas e detalhadas ainda necessitam ser feitas, especialmente quando se leva em consideração a diversidade na composição química do dejetos resultante de distintas categorias de animais e dietas e o fato de a própria chuva poder diminuir esse efeito de repelência durante o evento (Doerr et al., 2000).

Considerando que a chuva simulada foi realizada imediatamente após a aplicação do dejetos, o questionamento que surge é sobre como seriam as perdas de água caso a chuva fosse realizada alguns dias depois, quando o dejetos estivesse seco e aderido ao resíduo superficial de aveia-preta. A hipótese é de que a lavagem do dejetos aderido sobre o resíduo, bem como sua chegada até a superfície do solo, onde promoveria a obstrução dos macroporos, seria dificultada. Essa hipótese serve como sugestão para investigações futuras, mas, com base neste estudo, a aplicação de dejetos líquidos bovino, mesmo na menor dose ( $30 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ), teve implicações negativas em termos de infiltração e escoamento superficial de água.

### Perda de solo

As taxas de perda de solo foram praticamente nulas no tratamento sem aplicação de dejetos líquidos bovino (Figura 3), de forma que, ao final das duas horas de chuva, a quantidade total de solo perdido foi somente de  $32 \text{ kg ha}^{-1}$  (Figura 4). Essa pequena perda de solo pode estar associada à maior estabilidade de agregados (diâmetro médio ponderado de  $1,75 \text{ mm}$  na camada de  $0\text{--}5 \text{ cm}$ ) em solo utilizado com plantio direto e ao

consequente aumento da resistência à desagregação causada pela ação cisalhante do escoamento. As baixas perdas de água e solo demonstram, portanto, a capacidade desse solo, manejado em observância aos princípios conservacionistas, de suportar rotação e cobertura, de minimizar impactos ambientais no que diz respeito à qualidade da água.

A perda de solo nos primeiros 15 min de chuva, no entanto, aumentou significativamente com a dose de dejetos, e essa tendência se repetiu, embora nem sempre de forma significativa, nos outros sete intervalos de chuva avaliados (Figura 3). Outra tendência clara foi o aumento na taxa de perda de solo com o aumento da dose de dejetos de 30 para 60 e para  $90 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , embora também na maioria dos casos as diferenças não tenham sido estatisticamente significativas (Figura 3). Considerando a massa total de solo nas duas horas de chuva, percebe-se claramente um crescimento exponencial tendendo para máximo ( $R^2 = 0,971$ ,  $p < 0,001$ ) com o incremento das doses de dejetos - o intervalo entre 0 e  $30 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  correspondeu à porção mais ascendente da curva - seguido por certa tendência de estabilização nas doses maiores (Figura 4), como também observado para a perda de água (Figura 2).

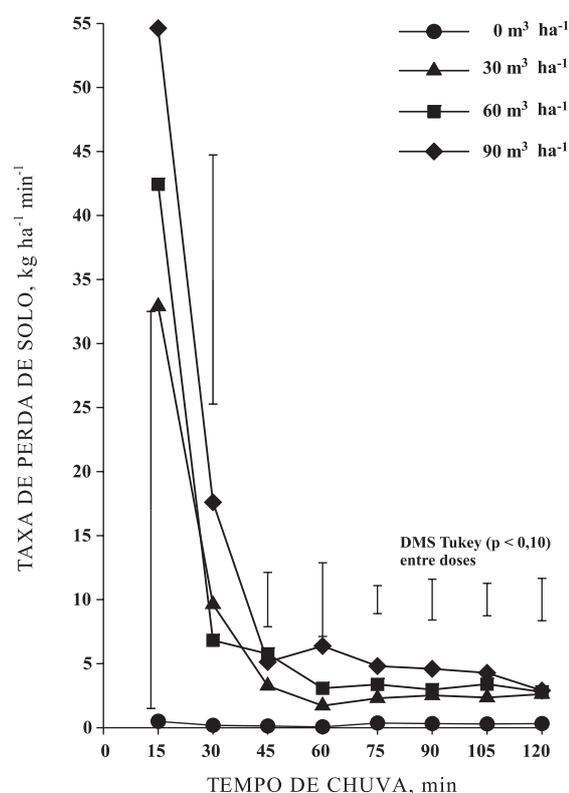
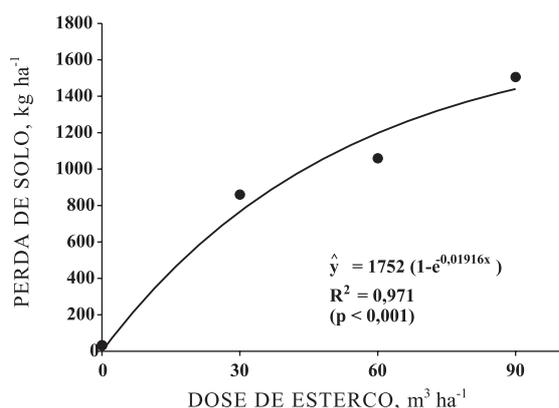


Figura 3. Taxa de perda de solo por escoamento superficial após a aplicação das doses de 0, 30, 60 e  $90 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  de dejetos líquidos de bovino em Latossolo, sob plantio direto e chuva simulada com duas horas de duração.



**Figura 4.** Perda acumulada de solo por escoamento superficial após a aplicação das doses de 0, 30, 60 e 90 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> de dejetos líquidos de bovino em Latossolo, sob plantio direto e chuva simulada com duas horas de duração.

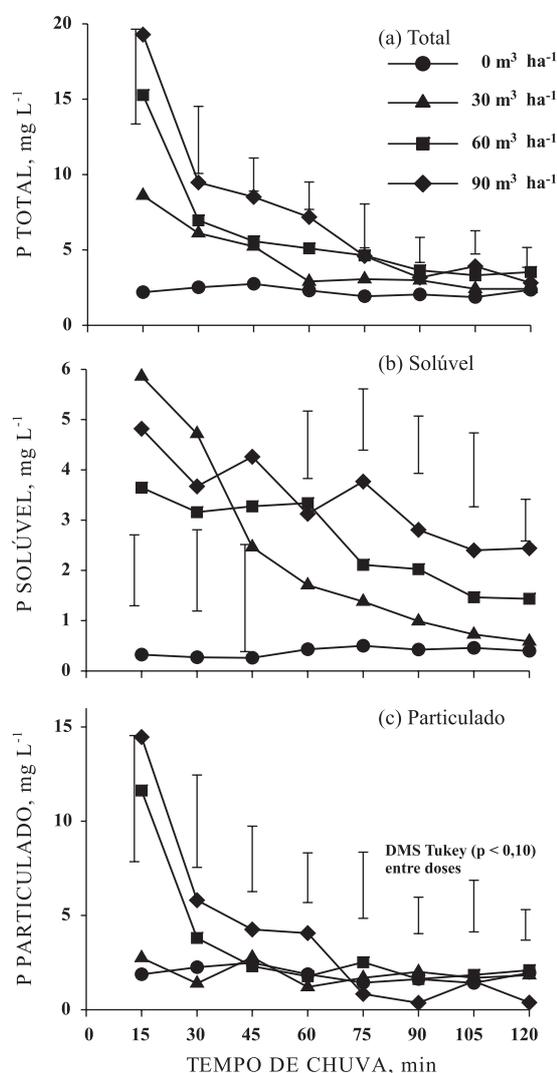
A quantidade de solo perdido foi praticamente nula no tratamento sem aplicação de dejetos (Figura 4), mantendo-se praticamente constante mesmo com o aumento da intensidade da chuva aos 60 min (Figura 3). Essas informações são evidências claras de que uma porção significativa do solo perdido foi oriunda do próprio dejetos aplicado. Nesse caso, parte do dejetos teria sido simplesmente transportada pelo escoamento superficial, sendo isso mais expressivo até 45 min após o início da chuva, estabilizando-se nos intervalos subsequentes (Figura 3). Não se conhecem a proporção de perda oriunda do dejetos líquido e a proporção oriunda de partículas minerais e agregados do solo.

A tendência de estabilização na perda total de solo em função do incremento da dose de dejetos (Figura 4) está possivelmente associada à capacidade máxima que o escoamento possui em transportar o dejetos e partículas/agregados de solo. Conforme o primeiro coeficiente do modelo exponencial (Figura 4), essa capacidade máxima de perda seria teoricamente de 1.752 kg ha<sup>-1</sup> de solo. É importante ressaltar, no entanto, que essa perda de solo em função das doses aplicadas e que essa capacidade máxima de transportar o solo variam de acordo com a intensidade e duração de cada chuva. Além disso, não se está levando em consideração um fluxo concentrado de escoamento, e sim difuso. Por isso, o comportamento dos resultados obtidos pode ser diferente quando se considerar todo o comprimento de uma encosta e o correspondente fluxo concentrado de escoamento possível de ocorrer nas suas porções inferiores.

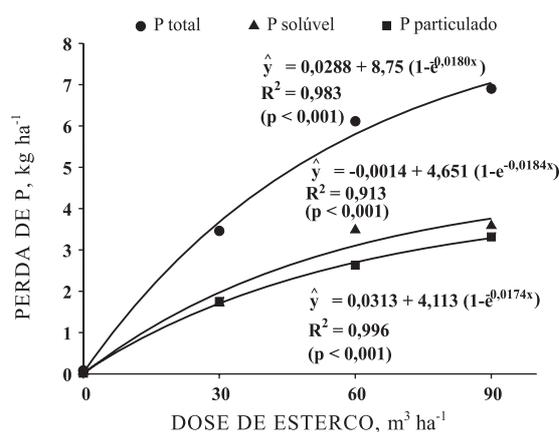
### Fósforo no escoamento

A concentração de P total no escoamento sem aplicação de dejetos foi praticamente constante ao longo das duas horas de chuva, com valor médio de 2,25 mg L<sup>-1</sup> (Figura 5a), que, combinado com o volume

de 5 mm de água perdido por escoamento (Figura 2), resultou numa perda total de P de somente 0,12 kg ha<sup>-1</sup> (Figura 6). A concentração média de P solúvel ao longo da chuva foi de 0,38 mg L<sup>-1</sup> (Figura 5b), representando 17 % do P total, enquanto a concentração de P particulado, 1,87 g L<sup>-1</sup> (Figura 5c), foi quase cinco vezes superior e representou 83 % da concentração de P total. Elevada proporção de P particulado no escoamento (aproximadamente 90 %) também foi obtida por Bertol (2005) após chuva simulada sobre um Latossolo com plantio direto, sem adubação orgânica e mineral. A maior proporção de perda de P particulado em relação ao solúvel não é esperada em sistemas conservacionistas de manejo, em razão de: (a) da menor geração de sedimento, ao qual o P particulado está associado, e (b) elevado teor de P na



**Figura 5.** Concentração de P total (a), P solúvel (b) e P particulado (c) no escoamento superficial após a aplicação das doses de 0, 30, 60 e 90 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> de dejetos líquidos de bovino em Latossolo, sob plantio direto e chuva simulada com duas horas de duração.



**Figura 6.** Perda acumulada de P total, P solúvel e P particulado por escoamento superficial após a aplicação das doses de 0, 30, 60 e 90 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> de dejetos líquidos de bovino em Latossolo, sob plantio direto e chuva simulada com duas horas de duração.

camada superficial do solo, especialmente naquela até 4 mm de profundidade (Zhang et al., 1997), que contribui significativamente para maiores concentrações de P solúvel no escoamento superficial (Sharpley et al., 1992). No caso deste estudo, acredita-se que a perda de P particulado no escoamento superficial esteja mais associada ao transporte do material orgânico derivado da palhada da superfície do solo do que ao transporte de partículas minerais e agregados de solo.

A aplicação de dejetos líquidos bovinos, porém, aumentou significativamente a concentração de P total no escoamento, especialmente nos primeiros 15 min de chuva, sendo esse aumento mais expressivo quanto maior a dose de dejetos aplicada (Figura 5a). Contudo, ao longo da chuva houve decréscimo nas concentrações de P total, de forma a se aproximarem daquela do escoamento sem aplicação de dejetos. O mesmo comportamento foi observado para P solúvel (Figura 5b) e P particulado (Figura 5c), exceto na dose de 30 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, em que a concentração de P particulado praticamente não variou ao longo do tempo nem diferiu do tratamento sem aplicação de dejetos (Figura 5c).

Valores de concentrações de P total na água superficial entre 0,01 e 0,02 mg L<sup>-1</sup> são considerados críticos, acima dos quais a eutrofização é acelerada (Daniel et al., 1998). De acordo com a resolução do Conama 357/2005 (Brasil, 2005), o valor máximo de concentração para água doce de classe com menor restrição é de 0,05 mg L<sup>-1</sup> de P total para ambiente lântico (água parada) e de 0,15 mg L<sup>-1</sup> para ambiente lótico (água corrente). As concentrações de P total no escoamento superficial, mesmo sem a aplicação de dejetos, estão muito acima dos valores críticos propostos por Daniel et al. (1998) e daqueles previstos na legislação brasileira, evidenciando o potencial desse escoamento em causar eutrofização caso chegue até

um curso de água, apesar de sofrer considerável diluição.

Seguindo a tendência observada para a perda de água e solo, a perda acumulada de P, em todas suas formas, aumentou exponencialmente (com tendência de máximo) com o aumento da dose de dejetos (Figura 6). Conforme os valores ajustados pela equação, a perda de P solúvel representou 53 a 54 % da perda de P total nas doses de 30, 60 e 90 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, o que significa que mais da metade do P escoado encontra-se numa forma prontamente disponível para algas de sistemas aquáticos e, por isso, possui elevado potencial de eutrofização. Considerando que a porcentagem de P solúvel no dejetos (42 %) é menor que a perdida no escoamento, deduz-se que houve seletividade do escoamento, com preferência de transporte do P solúvel em relação ao particulado, que supostamente tendeu a permanecer nos fragmentos do dejetos que constituíram o selo superficial.

As perdas acumuladas de P total por escoamento superficial (Figura 6) representaram 22, 18 e 14 % do P total aplicado nas doses de 30, 60 e 90 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, respectivamente, considerando os dados de concentração de P no dejetos (Quadro 1). Essa redução na porcentagem de perda do P total é coerente com a tendência de estabilização na quantidade de P perdida em função do incremento da dose e pode estar associada com a capacidade de transporte do escoamento. Quanto maior a dose de dejetos aplicada, maior tende a ser a saturação da capacidade de transporte da enxurrada e, proporcionalmente, menor tende a ser a perda em relação ao P aplicado. Contudo, isso não significa minimização do impacto ambiental, pois em termos absolutos a quantidade perdida de P tende a ser maior.

A chuva simulada imediatamente após a aplicação do dejetos líquidos foi certamente um fator determinante para as perdas de P por escoamento. Há evidências de que, quanto maior o intervalo entre a aplicação do dejetos e a realização ou ocorrência da chuva, menores tendem a ser as perdas de P (Gilley et al., 2007; Allen & Mallarino, 2008). Porém não há ainda um consenso para a explicação de tais evidências, mas, como comentado anteriormente sobre a perda de água, é possível que, com maior intervalo entre a aplicação do dejetos e a chuva, o dejetos tenda a secar e ficar mais aderido sobre os resíduos superficiais do solo, evitando a formação de selo superficial e diminuindo o potencial de transporte pela enxurrada.

No que se refere a perdas de P em trabalhos de aplicação de dejetos líquidos, efeitos de curto e longo prazos devem ser levados em consideração. Em termos de curto prazo, geralmente tem-se observado selamento da superfície do solo e perdas de P, especialmente com chuva logo após a aplicação do dejetos. Contudo, no longo prazo, com a melhoria da qualidade estrutural do solo em decorrência da aplicação do dejetos, as perdas tendem a ser menores nos tratamentos com aplicação de dejetos (Bundy et al., 2001; Smith et al., 2001).

A aplicação de dejetos líquidos bovinos possui, portanto, potencial de causar eutrofização e reduzir a qualidade da água em corpos hídricos no curto prazo. Essa situação pode ser mais crítica em áreas cujos terraços foram removidos, pois sem tais estruturas o escoamento possui praticamente fluxo livre até a porção inferior da encosta e, dependendo das condições da vegetação ciliar, até o curso de água. A aplicação de dejetos num momento que antecede a chuva, como nesse trabalho, representa uma situação extremamente crítica em termos de perda de P e poluição de corpos hídricos. Uma recomendação preliminar seria aplicar o dejetos em tempo seco, sem previsão de chuva para os próximos três a quatro dias (Allen & Mallarino, 2008). No entanto, novos estudos ainda devem ser conduzidos para confirmar essa recomendação, levando em consideração algumas particularidades, como tipo de resíduo na superfície do solo e características da chuva.

Em termos de dose de aplicação de dejetos, as perdas de P total associadas com a dose de  $90 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  foram praticamente o dobro daquelas associadas com a dose de  $30 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  (Figura 6), porém com tendência de estabilização em  $8,75 \text{ kg ha}^{-1}$  de P com o incremento da dose de dejetos (conforme o ajuste da equação para P total, Figura 6). Isso, associado com a perspectiva de aplicação do dejetos num período seco e práticas conservacionistas que impeçam a chegada da enxurrada aos corpos de água, pode eventualmente possibilitar a aplicação de doses maiores de dejetos, que em longo prazo estariam melhorando as características estruturais do solo. Entretanto, essa possibilidade ainda necessita ser melhor investigada em estudos futuros baseados em experimentos de longa duração, especialmente quando se leva em consideração o fato de que a aplicação de maiores doses de dejetos no longo prazo aumentou o teor de P no solo e pode, conseqüentemente, aumentar o potencial de perda via escoamento superficial. Numa perspectiva atual e mais prudente, e levando em consideração a condição experimental em que este trabalho foi conduzido, mesmo a dose de  $30 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  não seria recomendada, em razão das altas concentrações de P total no escoamento superficial. Em termos agrônômicos, a perda de  $7 \text{ kg ha}^{-1}$  de P com a dose de dejetos de  $90 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  representa um prejuízo praticamente insignificante, mas pode causar sérios impactos sobretudo em porções de cabeceiras de bacias hidrográficas, onde o efeito de diluição dessa carga poluente de P pode ser muito pequeno devido à baixa vazão do curso de água.

## CONCLUSÃO

A aplicação de dejetos líquidos bovinos, em dose igual ou superior a  $30 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , seguida imediatamente por chuva de média e alta intensidade ( $60$  e  $85 \text{ mm h}^{-1}$ )

aumentou a perda de água, solo, P total, P solúvel e P particulado em solo com plantio direto e, por isso, tem potencial de reduzir a qualidade da água nos cursos a jusante.

## AGRADECIMENTOS

À Fundação ABC, pelo apoio estrutural e financeiro; à Fundação Araucária (Paraná), pelo apoio financeiro; ao programa PIBIC/CNPq, pela concessão da bolsa de Iniciação Científica.

## LITERATURA CITADA

- ALLEN, B.L. & MALLARINO, A.R. Effect of liquid swine manure rate, incorporation, and timing of rainfall on phosphorus loss with surface runoff. *J. Environ. Qual.*, 37:125-137, 2008.
- APHA. Standard methods for the examination of water and wastewater. 19.ed. Washington, 1995. 1368p.
- BERTOL, O.J. Contaminação da água de escoamento superficial e da água percolada pelo efeito de adubação mineral e adubação orgânica em sistema de semeadura direta. Curitiba, Universidade Federal do Paraná, 2005. (Tese de Doutorado)
- BERTOL, O.J.; RIZZI, N.E.; BERTOL, I. & ROLOFF, G. Perdas de solo e água e qualidade do escoamento superficial associadas à erosão entre sulcos em área cultivada sob semeadura direta e submetida às adubações mineral e orgânica. *R. Bras. Ci. Solo*, 31:781-792, 2007.
- BRASIL - Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Resolução CONAMA nº. 357. Diário Oficial da União de 18/03/2005. Brasília, 2005.
- BUNDY, L.G.; ANDRASKI, T.W. & POWELL, J.M. Management practice effects on phosphorus losses in runoff in corn production systems. *J. Environ. Qual.*, 30:1822-1828, 2001.
- CAMARA, R.K. & KLEIN, W.A. Escarificação em plantio direto como técnica de conservação do solo e da água. *R. Bras. Ci. Solo*, 29:789-796, 2005.
- CORRELL, D.L. The role of phosphorus in the eutrophication of receiving waters: A review. *J. Environ. Qual.*, 27:261-266, 1998.
- DANIEL, T.C.; SHARPLEY, A.N. & LEMUNYON, J.L. Agricultural phosphorus and eutrophication: A symposium overview. *J. Environ. Qual.*, 27:251-257, 1998.
- DERPSCH, R.; ROTH, C.H.; SIDIRAS, N. & KÖPKE, U. Controle da Erosão no Paraná, Brasil: Sistemas de cobertura do solo, plantio direto e preparo conservacionista do solo. Eschborn, Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit, 1991. 272p.

- DOERR, S.H.; SHAKESBY, R.A. & WALSH, R.P.D. Soil water repellency: Its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance. *Earth Sci. Rev.* 51:33-65, 2000.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA/Fundação ABC. Mapa do levantamento semidetalhado de solos: Município de Castro. Castro, Fundação ABC, 2001.
- GILLEY, J.E.; EGHBALL, B. & MARX, D.B. Nutrient concentrations of runoff during the year following manure application. *Trans. Am. Soc. Am. Eng.*, 50:1987-1999, 2007.
- HAYGARTH, P.M. & SHARPLEY, A.N. Terminology for phosphorus transfer. *J. Environ. Qual.*, 29:10-15, 2000.
- HAYNES, R.J. & SWIFT, R.S. Stability of soil aggregates in relation to organic constituents and soil water content. *J. Soil Sci.*, 41:73-83, 1990.
- HOODA, P.S.; EDWARDS, A.C.; ANDERSON, H.A. & MILLER, A. A review of water quality concerns in livestock farming areas. *Sci. Total Environ.*, 250:143-147, 2000.
- LAL, R. Soil erosion research methods. 2.ed. Boca Raton, Soil and Water Conservation Society, 1994. 340p.
- LEVIEN, R.; COGO, N.P. & ROCKENBACH, C.A. Erosão na cultura do milho em diferentes sistemas de cultivo anterior e métodos de preparo do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 14:73-80, 1990.
- MARTINS, A.P.L. & REISSMANN, C.B. Material vegetal e as rotinas laboratoriais nos procedimentos químico-analíticos. *Sci. Agr.*, 8:1-17, 2007.
- MEYER, L.D. & McCUNE, D. Rainfall simulator for runoff plots. *Agric. Eng.*, 39:644-648, 1958.
- NEIBLING, W.H.; FOSTER, G.R.; NATTERMAN, R.A.; NOWLIN, J.D. & HOLBERT, P.V. Laboratory and field testing of a programmable plot-sizes rainfall simulator. p.405-414. In: *Erosion and sediment transport measurement. SYMPOSIUM INTERNATIONAL ASSOCIATION OF HYDROLOGY SCIENCES*, 1981. Bethesda. Proceedings of the Florence Symposium. Bethesda, 1981. p. 405-414. (Publication 133)
- PELES, D. Perdas de solo, água e nutrientes sob aplicação de gesso e dejetos líquidos de suínos. Curitiba, Universidade Federal do Paraná, 2007. 84p. (Tese de Mestrado)
- POTE, D.H.; DANIEL, T.C.; NICHOLS, D.J.; SHARPLEY, A.N.; MOORE JR. P.A.; MILLER, D.M. & EDWARDS. D.R. Relationship between phosphorus levels in three Ultisols and phosphorus concentrations in runoff. *J. Environ. Qual.*, 28:170-175, 1999.
- POTE, D.H. & DANIEL, T.C. Analyzing for total phosphorus and total dissolved phosphorus in water samples. In: PIERZYNSKI, G.M., ed. *Methods of phosphorus analysis for soils, sediments, residuals and water*. Raleigh, North Carolina State University, 2000. p.94-97.
- SHARPLEY, A.N.; CHAPRA, S.C.; WEDEPOHL, R.; SIMS, J.T.; DANIEL, T.C. & REDDY, K.R. Managing agricultural phosphorus for protection of surface waters: Issues and options. *J. Environ. Qual.*, 23:437-451, 1994.
- SHARPLEY, A.N.; FOY, B. & WITHERS, P.J. Practical and innovative measures for the control of agricultural phosphorus losses to water: An overview. *J. Environ. Qual.*, 21:30-35, 2000.
- SHARPLEY, A.N.; McDOWELL, R.W. & KLEINMAN, J.A. Phosphorus loss from land to water: Integrating agricultural and environmental management. *Plant Soil*, 237:287-307, 2001.
- SHARPLEY, A.N.; SMITH, S.J.; JONES, O.R.; BERG, W.A. & COLEMAN, G.A. The transport of bioavailable phosphorus in agricultural runoff. *J. Environ. Qual.*, 21:30-35, 1992.
- SHIGAKI, F.; SHARPLEY, A. & PROCHNOW, L.I. Animal-based agriculture, phosphorus management and water quality in Brazil: Options for the future. *Sci. Agric.*, 63:194-209, 2006.
- SMITH, K.A.; JACKSON, D.R. & WITHERS, P.J.A. Nutrient losses by surface run-off following the application of organic manures to arable land. 2. Phosphorus. *Environ. Pollut.*, 112:53-60, 2001.
- ZHANG, X.C.; NORTON, D. & NEARING, M.A. Chemical transfer from soil solution to surface runoff. *Water Res. Res.*, 33:809-815, 1997.