

# Uso agrícola do lodo de esgoto: influência nas propriedades químicas e físicas do solo, produtividade e recuperação de áreas degradadas

## Agricultural utilization of sewage sludge: effect on the chemical and physical properties of soils and on the productivity and recovery of degraded areas

Graziela Moraes de Cesare Barbosa<sup>1</sup>; João Tavares Filho<sup>1\*</sup>

### Resumo

Objetivou-se com esta revisão avaliar o panorama geral da reciclagem agrícola do lodo de esgoto e suas influências nas propriedades químicas e físicas do solo, na produtividade e na recuperação de áreas degradadas. O lodo de esgoto possui alguns dos nutrientes essenciais às plantas (nitrogênio, fósforo e micronutrientes), apresenta teores de umidade variável e é rico em matéria orgânica. Além disso, atua como um condicionador do solo, melhorando a estrutura e o estado de agregação das partículas do solo, diminuindo a densidade e aumentando a aeração do solo. Dessa forma, deve ser visto como um complemento à adubação das culturas, podendo contribuir para reduzir a utilização de fertilizantes químicos e o custo da adubação, pois a maior disponibilidade de nutrientes no solo decorrente da aplicação desse resíduo, pode levar a um melhor desenvolvimento da planta e conseqüentemente, a um aumento da produtividade. Em relação à recuperação de áreas degradadas, a aplicação de lodo proporciona rápido estabelecimento e crescimento de gramíneas e leguminosas. As plantas tendem a se mostrar mais vigorosas, com maior porcentagem de cobertura, maiores produtividades e melhor desenvolvimento do sistema radicular, enquanto a recuperação com a utilização de calagem e fertilização mineral pode renovar a vegetação. Contudo, as condições físicas e biológicas precárias do solo podem resultar na deterioração da cobertura vegetal antes que se verifique a efetiva recuperação do solo. É importante lembrar que o lodo de esgoto deve ser tratado antes de ser direcionado para uma disposição final, e não deve ser aplicado diretamente nas áreas agrícolas ou florestais sem ter sido submetido preliminarmente a uma série de tratamentos biológicos que vão reduzir sua carga orgânica e promover a estabilização do material. No Paraná não é recomendado o uso do lodo de esgoto para horticultura e demais produtos consumidos crus que tenham contato direto com o lodo. Seu uso é recomendado para as culturas de milho, trigo, cana-de-açúcar, sorgo, frutíferas e espécies florestais para recuperação de áreas degradadas. A normatização estadual define níveis de metais pesados no lodo e dose máxima de 50 toneladas de biossólidos / ha por um período de 10 anos.

**Palavras-chave:** Biossólido, adubo orgânico, fertilizante, matéria orgânica

<sup>1</sup> Professores do Dpto. de Agronomia, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, PR. Fone: 43 3371-4777, E-mail: tavares@uel.br

\* Autor para correspondência

## Abstract

This study is an overview of the agricultural recycling of sewage sludge and its impact on the chemical and physical properties of soils and on the productivity and recovery of degraded areas. Sewage sludge contains some of the essential plant nutrients (nitrogen, phosphorous, and micronutrients); it also has variable humidity content and is rich in organic matter. Sewage sludge also acts as a soil conditioner, improving soil structure and aggregation, thus decreasing density and increasing aeration of soils. Sewage sludge can complement other crop fertilization techniques by reducing the use of chemical fertilizers and fertilization costs as it increases nutrient availability in soils. As a result, the sludge can enhance plant development and productivity. Sludge application in degraded areas leads to a rapid growth of gramineous and leguminous plants. Plants growing in sludge-applied areas tend to be more vigorous and to cover larger areas (percentage); they also tend to have higher productivity and a better development of the root system. Soil recovery by liming and mineral fertilization can also lead to vegetation regrowth; however, the poor physical and biological soil conditions can deteriorate the cover plants before the soil is actually recovered. Sewage sludge must be processed before being used and cannot be applied directly to agricultural or forested land until biological treatments reduce the sludge organic content and promote organic matter stabilization. In the State of Paraná, Brazil, the direct application of sewage sludge on horticultural and other products that are ingested raw, is not recommended. Sludge fertilization is recommended for corn, wheat, sugarcane, sorghum, fruitiferous plants, and for forest plant species used to recover degraded areas. State regulations determine the levels of heavy metals allowed in the sludge and the maximum dosage of 50 ton biosolid matter/ha, for a 10-year period.

**Key-Word:** Biosolid matter. Organic fertilization. Fertilizer. Organic matter.

## Introdução

Os estudos com lodo de esgoto, subproduto gerado nas estações de tratamento de esgotos urbanos indicam que ele possui alguns nutrientes essenciais às plantas, é rico em matéria orgânica, e atua como um condicionador do solo, melhorando sua estrutura. Quando tratado e processado, o lodo recebe o nome de biossólidos e adquire características que permitem sua utilização agrícola de maneira racional e ambientalmente segura.

Atualmente, as perspectivas de desenvolvimento e a expectativa de incremento da produção de lodo pela ampliação da rede de coleta e tratamento de esgoto caracterizam a questão como um dos mais graves passivos ambientais urbanos no Brasil. Não se dispõe de dados consistentes referentes à produção atual de lodo, sendo que as estimativas apontam para números da ordem de 9.000 a 13.000 toneladas diárias de lodo desaguado (ANDREOLI; SPERLING; FERNANDES, 2001).

Procurando evitar epidemias, algumas cidades européias, a partir de 1840, adotaram tecnologias de

tratamento de esgoto e lixo iniciando pela disposição do esgoto no solo. Este procedimento simples resultou em drástica redução de mortalidade causada por doenças endêmicas Jewell (apud ANDREOLI; PEGORINI, 2000).

Resultados de pesquisas indicam que o lodo de esgoto é rico em nitrogênio, fósforo e micronutrientes, apresenta teores de umidade variável e alta concentração de matéria orgânica. Um dos principais efeitos da matéria orgânica sobre os atributos físicos do solo, está associado ao grau de agregação, que conseqüentemente, afeta a densidade, porosidade, aeração e a capacidade de retenção e infiltração de água (BARBOSA; TAVARES FILHO; FONSECA, 2002a), evidenciada a importância de se estudar a aplicação do lodo de esgoto em diversos tipos de solos e ambientes. Estes estudos são imprescindíveis para a avaliação do impacto ambiental, principalmente considerando o efeito residual do lodo em longo prazo. Segundo Andreoli (1999), o aproveitamento racional do lodo de esgoto exige a busca de informações consistentes que possam garantir o uso racional deste resíduo. Estas informações devem contemplar

aspectos científicos e ao mesmo tempo fornecer parâmetros em relação a quanto, quando e quantas vezes aplicar nos diferentes solos agrícolas, pois, segundo Fernandes et al. (1996), a utilização do lodo como fonte de matéria orgânica e nutrientes tem riscos associados, especialmente relacionados ao conteúdo de metais pesados e à sanidade. Assim, a definição de políticas para a reciclagem agrícola do lodo de esgoto deve ser baseada em estudos que definam critérios agronômicos, ambientais e sanitários, de modo a garantir sua utilização segura.

Dessa forma, objetivou-se com esta revisão analisar o uso agrícola do lodo de esgoto e suas influências nas propriedades químicas e físicas do solo, na produção de culturas e na recuperação de áreas degradadas.

### *Alternativas para disposição final do lodo de esgoto*

As Estações de Tratamento de Esgoto Sanitário (ETES), geram um subproduto denominado lodo de esgoto, cuja composição média aponta para uma mistura de água (99,9%) e sólidos (0,1%), sendo que do total de sólidos, 70% são orgânicos (proteínas, carboidratos, gorduras, etc.) e 30% inorgânicos (areia, sais, metais, etc.), e cuja disposição final constitui um dos grandes problemas operacionais para essas estações de tratamento (ANDREOLI, 1999).

O lodo de esgoto deve ser tratado antes de ser direcionado para uma disposição final. Os sistemas de tratamento de esgotos normalmente utilizam, de forma otimizada, os fenômenos de biodegradação que já ocorrem na natureza sendo que, os métodos mais comuns de tratamento são os biológicos, que utilizam os microorganismos presentes no esgoto para degradar a matéria orgânica e purificar a água (FERREIRA; ANDREOLI; JÜRGENSEN, 1999). Os objetivos desse processo biológico são coagular e remover colóides não sedimentáveis e degradar parcialmente ou estabilizar a matéria orgânica remanescente no esgoto após o tratamento (FERNANDES, 2000). Segundo o autor, o lodo é

constituído, em boa parte, por bactérias vivas. Como a eficiência dos processos biológicos está ligada à quantidade de células vivas atuantes no processo, os sistemas de tratamento mantêm o aflente em um meio rico em lodo. Sendo assim, o lodo é matéria prima para os processos biológicos de tratamento de esgoto e seu excesso passa a ser considerado um resíduo.

O momento e as condições em que o lodo deixa de ser matéria prima para se transformar em resíduo, depende da tecnologia do sistema de tratamento de esgoto e de sua operação. Durante o processo, coprecipitam microorganismos patogênicos e metais pesados. Assim o lodo caracteriza-se pelo seu alto potencial poluidor (ANDREOLI; PEGORINI, 2000). Portanto, a quantidade e qualidade do lodo produzido por uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) dependem da vazão de esgoto tratado, das características do lodo, do tipo de tratamento e da operação da ETE (FERREIRA; ANDREOLI; JÜRGENSEN, 1999).

Existem várias alternativas tecnicamente aceitáveis para o tratamento e disposição final do lodo de esgoto. A mais comum envolve a digestão anaeróbia que pode ser seguida pela destinação final em aterros sanitários exclusivos, seguida de outras alternativas como o “Landfarming”, aterros sanitários, lagoas de armazenagem, a incineração e a reciclagem agrícola (FERREIRA; ANDREOLI; JÜRGENSEN, 1999).

### *Reciclagem agrícola*

A reciclagem agrícola é a forma de disposição final do lodo de esgoto que pode ser considerada mais adequada em termos técnicos, econômicos e ambientais, desde que convenientemente aplicada (ANDREOLI, 1999; TSUTIYA, 1999a), uma vez que apresenta o menor custo para a reciclagem de matéria orgânica e nutrientes (MATTHEWS, 1998), e tem se constituído em uma das formas mais utilizadas em diversos países desenvolvidos (Bélgica, 29%; Dinamarca, 54%; França, 58%; Alemanha, 27%;

Itália, 33%; Espanha, 50%; Reino Unido, 44%) como condicionador e fertilizante do solo, sendo que nos Estados Unidos o uso do lodo como fertilizante data de 1927 (NEIVA, 1999).

Dentro dessa visão, e devido às restrições ao uso de aterros sanitários, o percentual de lodo reciclado deverá aumentar substancialmente nos próximos anos (FERNANDES, 1998). Na maioria dos países existem normas que regulamentam a destinação do lodo, garantindo uma disposição segura. A Europa unificada procura chegar a um padrão comum de disposição de lodo de esgoto, respeitando-se as particularidades geográficas e climáticas de cada país. Nos Estados Unidos, atualmente cerca de 25 % de todo biossólidos produzido ( $13.10^6$  Mg ano<sup>-1</sup>), são utilizados na agricultura (TSUTIYA, 1999b) e 41% em solos florestais (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 1993).

Essa reciclagem deve estar condicionada a regras que definam a qualidade do material a ser reciclado e os cuidados exigidos para estabilização, desinfecção e utilização do mesmo (ANDREOLI, 1999). Para Tsutiya (1999a) antes da disposição do lodo em áreas agrícolas deve-se também considerar os seguintes aspectos: características das áreas, condições do solo, taxa de aplicação e cultura agrícola a ser explorada.

Para minimizar riscos, é necessária a aprovação de legislação específica que discipline o uso do lodo na agricultura, como ocorre na Europa e nos Estados Unidos (SILVA; RESCK; SHARMA, 2000). No Brasil, ainda não existe uma lei federal que regulamente a disposição do lodo no solo. No Estado de São Paulo, a CETESB (Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental), órgão vinculado à Secretaria do Meio Ambiente, estabeleceu em 1999 normas provisórias estaduais (Norma Técnica PR.230), para regulamentar o uso agrícola de lodos obtidos por tratamentos biológicos, incluindo o lodo de esgoto. Os limites adotados pela CETESB são os mesmos adotados pela United States Environmental Protection Agency (1993) nos EUA. Como as condições edafoclimáticas brasileiras são diferentes,

isto pode resultar em erros nesta medida regulamentadora. No Distrito Federal, a CAESB distribuía o lodo de esgoto mediante a garantia de que os usuários do resíduo respeitariam as normas sugeridas pela USEPA.

No estado do Paraná, a SANEPAR (Companhia de Saneamento do Paraná) elaborou um Manual Técnico visando orientar o usuário do biossólido, os operadores de estações de tratamento e os tomadores de decisão sobre procedimentos de produção do lodo. Segundo Andreoli (1999) a normatização estadual define níveis de metais pesados no lodo e dose máxima de 50 toneladas de biossólidos/ha em um período de 10 anos. Segundo o autor, neste período não há risco de contaminação do solo nem dos produtos produzidos, em níveis tóxicos. Para ser utilizado no solo, o lodo de esgoto deve, segundo a Companhia de Saneamento do Paraná (1997), passar por processos de higienização e estabilização, dentre os quais, está a calagem que é um processo de estabilização, desinfecção química do lodo e consiste na adição e mistura de cal ao lodo em doses altas para a alcalinização brusca do meio, elevando o pH a níveis ligeiramente superiores a 12 por algumas horas. Com isso inativa-se e destrói-se a maior parte dos patógenos presentes no lodo. Com a calagem, a temperatura pode elevar-se a valores próximos a 60°C durante o choque alcalino. Este método concorre também para a desidratação e estabilização química do lodo, reduzindo a emissão de odores, e é considerado alternativa simples e de custo baixo.

Apesar das diretrizes (legislação específica) variarem consideravelmente entre países, e no caso do Brasil, entre estados, a experiência mundial tem mostrado que, a aplicação do lodo de esgoto na agricultura obedecendo a diretrizes fixadas para o seu uso, não ocasiona efeito adverso ao homem ou ao ambiente (WEBBER, 1998). Reduz os efeitos adversos causados por outras formas de deposição final (como a incineração), melhora o balanço do CO<sub>2</sub> pelo incremento da matéria orgânica no solo e diminui a necessidade de fertilizantes minerais para produção agrícola (OUTWATER, 1994).

Por outro lado, a prática envolve alguns impactos ambientais negativos potenciais, que demandam controle estrito. É característica do tratamento de esgoto a decantação de organismos patogênicos, compostos orgânicos complexos e moléculas ligadas a metais pesados. Estes poluentes podem ser transferidos ao solo, às plantas e às águas superficiais e subterrâneas, através de processos de escoamento superficial e lixiviação (FERNANDES; PIERRO; YAMAMOTO, 1993). Outro problema apresentado pelo lodo é a presença de nitratos na sua composição. Devido à falta de sincronismo entre a mineralização do nitrogênio e a absorção deste nutriente pelas plantas, corre-se o risco de perdê-lo por lixiviação levando à contaminação do lençol freático. Uma vez adicionados ao solo, alguns contaminantes do lodo podem entrar na cadeia alimentar, acumular no próprio solo, no ar, nas águas superficiais, nos sedimentos e nas águas subterrâneas (LOGAN; CHANEY, 1984). Portanto, os autores enfatizam a necessidade de uma rigorosa legislação que regulamente e estabeleça regras para a adição do resíduo ao solo. Indicam também a necessidade de realizar estudos que determinem riscos ambientais a curto e longo prazo.

O lodo de esgoto não deve ser aplicado diretamente nas áreas agrícolas ou florestais sem ter sido submetido preliminarmente a tratamentos biológicos que reduzam sua carga orgânica e promova a estabilização do material. A WEF (Water Environmental Federation), recomenda o uso do termo biossólido para designar o lodo que passa por processo de tratamento biológico e que apresenta potencial de uso benéfico em sistemas agro-florestais, sem apresentar riscos à saúde humana e animal. O lodo cru que não tenha recebido tratamento adequado para controle de poluentes e patógenos não é considerado biossólido (POGGIANI; GUEDES; BENEDETTI, 2000).

No estado do Paraná não é recomendado o uso do lodo de esgoto para horticultura e para cultivo de produtos consumido crus que tenham contato direto com o lodo. Seu uso só é recomendado para as

culturas de milho, trigo, cana-de-açúcar, sorgo, frutíferas, espécies reflorestais e para recuperação de áreas degradadas (COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARANÁ, 1997).

Além do conhecimento dos impactos ambientais positivos e negativos causados pela utilização do produto, a reciclagem agrícola do lodo de esgoto pressupõe o desenvolvimento de tecnologias que permitam o processamento e controle da qualidade do lodo produzido, o controle das formas de comercialização e distribuição e a inserção do produto nos sistemas agrícolas, de forma a maximizar os impactos positivos e minimizar os impactos negativos (ANDREOLI, 1999). As limitações para a aplicação de lodo de esgoto em áreas agrícolas objetiva minimizar os riscos de poluição dos solos e águas superficiais (ANDREOLI; PEGORINI, 2003).

#### *Influência do lodo de esgoto nos atributos químicos do solo*

O lodo de esgoto encerra na sua composição, nutrientes e elementos benéficos necessários para o desenvolvimento e produção das plantas, os quais, por se encontrarem em sua grande parte na forma orgânica, são liberados gradativamente ao solo, por meio de processos oxidativos, aumentando a absorção pelas plantas e diminuindo os riscos de poluição ambiental (MELO; MARQUES, 2000).

A reciclagem agrícola do lodo, segundo Andreoli (1999), é uma das possibilidades de menores impactos ambientais, uma vez que o lodo pode transformar-se numa importante fonte de matéria orgânica e nutrientes essenciais ao desenvolvimento das plantas.

Em solos de regiões tropicais e subtropicais, a matéria orgânica (MO) desempenha papel fundamental na melhoria da CTC e no fornecimento de nutrientes, principalmente para aqueles ricos em caolinita e gibsitita. Diante disto, o manejo da matéria orgânica torna-se prática muito importante para o sucesso das atividades agropecuárias nestes solos (MELO; MARQUES, 2000).

Os solos paranaenses são, na sua maioria, pobres em nutrientes devido a sua origem ou elevado grau de intemperismo. As condições de clima tropical e subtropical com muita umidade e temperaturas elevadas são fatores que aceleram o processo de degradação da matéria orgânica; por esta razão o manejo inadequado do solo agrícola pode reduzir a capacidade produtiva dos solos; e a adição de matéria orgânica é importante para a manutenção e até melhoria do potencial produtivo desses solos (BISCAIA; MIRANDA, 1996).

A aplicação de lodo de esgoto no solo causa aumento no teor de matéria orgânica (MELO; MARQUES; SANTIAGO, 1994), com aumento na CTC (KIEHL, 1979; MELO; MARQUES; SANTIAGO, 1994). Marques (1997) obteve aumentos nos teores de matéria orgânica do solo até um ano após a aplicação do lodo de esgoto, trabalhando com um Latossolo Vermelho-Escuro textura média cultivado com cana-planta.

Favaretto et al. (1997) observaram que os teores de C tenderam a reduzir à medida que se aumentavam as doses de lodo de esgoto, evidenciando aumento na degradação da matéria orgânica, porém, não se constataram diferenças significativas entre a adubação mineral e doses de lodo (32, 64 e 96 t ha<sup>-1</sup> base úmida).

Oliveira et al. (2002) aplicaram 33, 66 e 99 t ha<sup>-1</sup> de lodo de esgoto num Latossolo Amarelo distrófico e concluíram que as aplicações do lodo promoveram aumentos lineares nos teores de C orgânico do solo, durante os dois primeiros anos. Esse aumento da matéria orgânica do solo também foi constatado por Melo, Marques e Santiago, (1994).

Silva, Boaretto e Berton (1995) verificaram que o aumento dos teores de matéria orgânica do solo contribui para o aumento da CTC, mediante geração de cargas negativas devido a alta concentração de matéria orgânica que o lodo possui. Além disso, foi obtido também aumento nos teores de Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup>, contribuindo para o aumento da saturação por bases (V%).

Stevenson (1982) mostrou que a adição de material orgânico do solo pode estimular a decomposição do húmus devido ao aumento demasiado da população microbiana, que produz as enzimas que atacam a matéria orgânica nativa do solo, ocasionando perdas de carbono. Entretanto, o autor observa que sucessivas aplicações poderiam recuperar e inclusive aumentar o teor de matéria orgânica do solo.

Segundo Kiehl (1979), as plantas têm dificuldades de sobreviver em solos com reação inferior a pH 4,0 e superior a pH 9,0, sendo que a maioria delas sobrevivem melhor na faixa de pH de 6,0 a 7,0. A aplicação do lodo no solo provoca uma diminuição inicial de pH, especialmente nos 6 primeiros meses, em razão da formação de ácidos orgânicos, que após a sua estabilização com elementos do solo, promovem um aumento do pH (EPSTEIN; TAYLOR; CHANEY, 1976).

Em experimento conduzido a campo, utilizando um Latossolo Vermelho distrófico, Silva, Resck e Sharma (2002) estudaram doses de lodo de esgoto (54, 108 e 216 t ha<sup>-1</sup> de lodo úmido) associado à aplicação de calcário (1 t ha<sup>-1</sup>) e à adubação mineral completa. Os resultados indicaram que em nenhum dos cultivos foram observados sintomas de deficiência visual para o K. Houve manutenção da produtividade de milho por três anos, obtida apenas com a aplicação de dose única de lodo de esgoto no primeiro ano, sem o emprego de outro insumo, comprando seu efeito residual mesmo na dose mais baixa.

Em cultura do girassol e feijão, Deschamps e Favaretto (1997) observaram que o lodo de esgoto pode ser utilizado como adubação orgânica, substituindo em 100% a quantidade de nitrogênio recomendado, sem prejuízo em termos de rendimento quando comparado à adubação mineral.

Estudando um Latossolo Vermelho eutroférico, Barbosa, Tavares Filho e Fonseca (2002b) concluíram que a acidez do solo, a CTC, a saturação por bases (V), os teores de Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, P e o carbono aumentaram em função das doses de lodo caído

aplicadas no solo, sendo os melhores resultados alcançados nas parcelas que receberam 36 t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>. O aumento do pH do solo pode estar diretamente relacionado com a cal virgem misturada ao lodo, gerando um produto alcalino, com efeito residual (RAIJ, 1991). O aumento do pH do solo foi verificado por vários autores (ANDREOLI, 1999; MELO; MARQUES; SANTIAGO, 1994; SILVA et al., 1998; BERTON; CAMARGO; VALADARES, 1989), os quais constataram que o lodo adicionado ao solo agiu como corretivo de acidez, reduziu o teor de alumínio trocável e melhorou as condições de absorção e nutrientes pelas plantas.

Em solos argilosos e arenosos do Paraná, Andreoli (1999) utilizou doses de 6 a 18 t ha<sup>-1</sup> de lodo caleado (50% cal do peso seco do lodo) e obteve resultados que apresentaram elevação do pH, teores de Ca + Mg, CTC e V, e redução nos teores de potássio. A redução dos teores de K, decorre da competição com o Ca, que resulta no deslocamento deste nutriente do complexo de troca do solo.

Quando se aplicam grandes doses de lodo caleado deve ser observada cuidadosamente a concentração de Ca, pois, segundo Brady (1989), os excessos de Ca podem determinar deficiências de Fe, Mn, Cu e Zn, além de complexar e dificultar a absorção dos fosfatos.

Berton, Camargo e Valadares (1989) também observaram aumento na produção de matéria seca e na absorção de N, P, Ca, Mg e Zn pelas plantas de milho em função das doses de 40 e 80 t ha<sup>-1</sup> de lodo, para cinco solos estudados.

A liberação gradativa de nutrientes pelo lodo foi observada por Abrahão (apud MELO; MARQUES, 2000), que adicionou diferentes doses de lodo de esgoto a um LE textura média. No tratamento testemunha, adicionou P como fertilizante mineral. Os resultados indicaram que praticamente todo o P adicionado como fosfato de sódio foi imobilizado pelo solo na primeira amostragem, enquanto que o P adicionado com o lodo foi diminuindo com o tempo. O tratamento com lodo forneceu sempre um teor

mais elevado de P extraível pela resina do que o tratamento com fertilizante mineral.

Da Ross et al. (1993) avaliaram vários efeitos imediatos do lodo de esgoto nas culturas de milho, aveia, ervilhaca e também sobre as características químicas do solo. A adição do lodo proporcionou maior rendimento de matéria seca, maior absorção de N, P e de K pelo milho; e aumentou o rendimento de matéria seca da associação aveia e ervilhaca e na produção de grãos de aveia. Os autores citam também a necessidade de suplementação mineral potássica quando do uso exclusivo do lodo de esgoto como fertilizante.

De modo geral, o lodo de esgoto é pobre em K, não suprimindo as necessidades das plantas e vários autores têm recomendado a complementação do K quando da sua utilização, de modo a evitar reflexos negativos na produtividade (SILVA et al., 1998; ANDREOLI, 1999).

Em experimento conduzido em casa de vegetação, com as culturas de milho e arroz, Betiol, Carvalho e Franco (1983) observaram que o lodo de esgoto na dose de 9 t ha<sup>-1</sup> não apresentou problemas de fitotoxicidade, podendo ser usado como fonte de N, P e K, sem necessidade de complementação mineral, mas não diferiu estatisticamente na produção de massa seca em relação à adubação mineral. Concluíram, ainda, que houve uma tendência à maior produção de massa seca nos tratamentos com lodo de esgoto, devido ao melhor desenvolvimento do sistema radicular, o que pode ser explicado pelo efeito da matéria orgânica sobre as propriedades físico-químicas do solo.

Barbosa, Tavares Filho e Fonseca (2002b) verificaram aumento nos teores de P à medida que aumentaram as doses de lodo de esgoto, acima de 24 t ha<sup>-1</sup> em relação à análise inicial do solo. Estes resultados são semelhantes aos encontrados por Silva et al. (1998) e Andreoli (1999).

Epstein, Taylor e Chaney (1976) observaram a limitação de aplicação de maiores doses (120 e 240 t ha<sup>-1</sup> base úmida) em solos com valores de pH variando

de 6,5 a 6,8. Foram aplicados cinco níveis de lodo e composto e os resultados indicaram aumentos da capacidade de retenção e do conteúdo de água no solo, aumentando também a salinidade, o nível de cloro e a capacidade de troca catiônica. Os níveis de nitrato foram os mais altos na profundidade de 15 a 20 cm e a variabilidade de P foi alta nos dois primeiros anos, superando as exigências nutricionais do milho.

Quanto ao nitrogênio, Andreoli (1999) observou que nas maiores doses de lodo calado, quando o pH estava alcalino, teve uma correlação negativa com a produtividade. Segundo o autor, nas superdosagens o estoque de nitrogênio no sistema solo-planta estava muito acima dos níveis necessários, o que explica a baixa produtividade, provavelmente devido ao estímulo ao desenvolvimento vegetativo. Por outro lado, podem ter ocorrido maiores perdas de N por lixiviação e/ou volatilização. Desta forma, o aumento do pH representa um dos fatores que devem ser considerados como limitantes de dosagens, quando o lodo for calado. Esta limitação, para o autor, foi observada em três situações (a) nas dosagens mais elevadas de lodo calado; (b) em solos com pH inicial alto; (c) em solos mais arenosos ou de baixa CTC.

### *Influência do lodo de esgoto nos atributos físicos do solo*

A matéria orgânica presente no lodo de esgoto melhora o estado de agregação das partículas do solo, diminui sua densidade e aumenta a aeração (MELO; MARQUES, 2000).

A influência da aplicação do lodo sobre a densidade do solo ocorre porque a matéria orgânica e os cátions presentes ( $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Al}^{3+}$  dentre outros) promovem a agregação de partículas e determinam aumento no volume do solo, causando redução na sua densidade (BARBOSA; TAVARES FILHO; FONSECA, 2002a; MELO; MARQUES, 2000; FIEST; ANDREOLI; MACHADO, 1998; JORGE; CAMARGO; VALADARES, 1991).

Marciano (1999), estudando os efeitos da incorporação de doses de lodo de esgoto (0 - 33 - 66

e 99  $\text{Mg ha}^{-1}$  no primeiro ano e 0 - 37 - 74 e 112  $\text{Mg ha}^{-1}$  no segundo) a um Latossolo Vermelho Amarelo, detectou tendência de redução nos teores de argila e densidade do solo e aumento nos teores de areia. As análises de amostras obtidas na camada 0-20 cm, em diferentes épocas do ano, mostraram resultados que se correlacionaram de forma linear e positiva com as doses de lodo, com efeito mais expressivo no segundo ano.

Barbosa, Tavares Filho e Fonseca, (2002a) verificaram uma tendência de aumento de agregação do solo conforme aumentava a dose de lodo calado, semelhantes aos encontrados por Epstein, Taylor e Chaney (1976).

Jorge, Camargo e Valadares (1991) aplicaram lodo de esgoto nas doses de 40 e 80  $\text{t ha}^{-1}$  e ainda 80  $\text{t ha}^{-1}$  fracionado, com e sem adição de calcário, em Latossolo Vermelho Escuro distrófico cultivando por quatro anos com milho. Verificaram que nos tratamentos com lodo e com lodo mais calcário (80  $\text{t ha}^{-1}$ , sendo 20  $\text{t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ) houve aumento da quantidade de agregados com diâmetro superior a 1 mm, aumentando também, em todos os tratamentos, o índice de agregação. A aplicação de 40 e 80  $\text{t ha}^{-1}$  de lodo favoreceu a formação de macroporos e a dose de 80  $\text{t ha}^{-1}$  fracionada (4 x 20  $\text{t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ) favoreceu a formação de microporos. A retenção de água foi menor no tratamento de 40  $\text{t ha}^{-1}$  de lodo.

Outros atributos físicos influenciados positivamente pelo lodo são a taxa de infiltração da água no solo, o volume de poros e a capacidade de retenção de água, que é afetada pelo número e distribuição dos poros e pela superfície específica (MELO; MARQUES, 2000; JORGE; CAMARGO; VALADARES, 1991).

Marciano (1999), ao aplicar doses de lodo de esgoto a um Latossolo Vermelho-Amarelo, observou que os efeitos da dose de lodo sobre o conteúdo de água do solo somente foram observados no potencial mátrico de  $-80\text{Kpa}$ , que estava próximo à saturação do solo.

Gupta, Dowdy e Larson (1977) concluíram que a condutividade hidráulica em solo não saturado diminuiu conforme o aumento da dose de lodo. Barbosa, Tavares Filho e Fonseca (2004), trabalhando com um Latossolo Vermelho eutrófico, verificaram que a dose de 12 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo de esgoto aumentou a condutividade hidráulica nos potenciais 0 e -1 kPa, respectivamente. Os autores observaram o selamento da superfície do solo nas doses acima de 12 Mg ha<sup>-1</sup>, dificultando sua infiltração. Este fenômeno foi comprovado por Marciano et al. (2001).

Com relação à resistência do solo à penetração, Barbosa, Tavares Filho e Fonseca (2002a) verificaram diminuição da resistência na dose de 12 t ha<sup>-1</sup> na profundidade de 0,10-0,20m. Os autores relataram que essa diferença significativa encontrada na superfície pode ter sido em função da aplicação superficial do lodo, não influenciando as camadas mais profundas.

O crescimento das raízes foi avaliado por Sopper (1993) em áreas com aplicação de lodo, sendo observado um rápido estabelecimento e crescimento de milho comum, milho doce, soja e sorgo, com maior porcentagem de cobertura e maiores produtividades decorrentes do melhor desenvolvimento das raízes. Resultados semelhantes foram obtidos por Bottega e Nascimento (1999) que observaram aumento na penetração de raízes em decorrência do aumento da porosidade do solo.

Os efeitos da aplicação de calcário nas propriedades físico-químicas do solo dependem da sua característica mineralógica e na dose aplicada Werwey e Overbeek (apud KOENIGS, 1961). O poder flocculante dos cátions, que predominam na solução do solo, aumenta de acordo com a seqüência: mono-di-trivalentes. Assim, estes autores complementam que a maior quantidade de um cátion bivalente pode ocasionar o mesmo efeito de um cátion trivalente em menor quantidade. O Fe e principalmente o Al são cátions de grande poder flocculante; a inativação do ferro e alumínio trocáveis via calagem retira estes dois elementos dos sítios de

adsorção, cedendo lugar ao Ca, cujo poder flocculante é menor. As correlações negativas, obtidas para os teores de Al e Fe em relação à dispersão de argila em água, auxiliam na comprovação de tal fenômeno. Neste sentido, Fassbender (1984) relatou que a flocculação depende do complexo de troca, das características da dupla camada difusa e dos cátions adsorvidos. Além da interferência da valência dos cátions na flocculação dos colóides do solo, a dupla camada difusa tem grande influência sobre os fenômenos de flocculação e dispersão; a sua espessura é alterada pelas concentrações ou atividades iônicas na suspensão coloidal. Em ambientes de baixa concentração eletrolítica, a dupla camada difusa torna-se mais espessa, mantendo, dessa maneira, os colóides afastados e dispersos. Segundo Uehara (1979), para obter dispersão das argilas, é necessário que o pH do solo se encontre mais elevado do que o PCZ.

A presença de sódio (Na) no complexo de troca de solos da região do semi-árido é uma das principais causas da dispersão de argilas, que restringe as propriedades físicas destes solos. Desta forma, a aplicação de sulfato de cálcio nesses solos melhora suas condições físicas. Esse efeito se deve, basicamente, à substituição do sódio trocável pelo cálcio e, em seguida, à lixiviação dos íons de sódio (GOLDBERG; FORSTER, 1990). Segundo os autores, à medida que o Ca substitui o Na, através da reação de troca, tem-se predomínio do Ca no complexo de troca e aumento da concentração eletrolítica da solução. Isto diminui a espessura da dupla camada difusa e conseqüentemente aumenta a flocculação do solo.

Gupta et al. (1984) avaliaram a dispersão de argilas em solos e as relações com o efeito sódico, matéria orgânica e carbonato de cálcio. O aumento da alcalinidade ou da relação de adsorção de sódio (RAS) aumentou também a dispersão de argila. O carbonato de cálcio e as altas concentrações eletrolíticas mostraram-se favoráveis à flocculação. A elevação da alcalinidade na presença de substâncias húmicas aumentou a dispersão de argila.

Albuquerque et al. (2000) verificaram que a maior dose de calcário ( $18 \text{ t ha}^{-1}$ ) causou dispersão da argila e o aumento no PCZ (13%) foi menor que aumento no valor do pH (40%). Portanto, segundo os autores, em solos com PCZ baixo, a calagem pode elevar com maior facilidade o valor do pH e a diferença entre pH e PCZ e, conseqüentemente, a dispersão da argila. Nestas condições, a dispersão da argila ocorre devido ao aumento da carga líquida negativa e da espessura da dupla camada elétrica difusa, ocasionada pela substituição do Al pelo Ca e Mg.

As alterações da dispersão das argilas podem afetar algumas variáveis físicas importantes do solo, como a taxa de infiltração e a permeabilidade, em virtude da obstrução de poros na camada subsuperficial pelo material disperso, movimentado pela água de percolação (HARIDASAN; CHIBBER, 1971).

Além disso, o selamento superficial ou encrostamento no solo ocorre quando a água com colóides em suspensão infiltra, obstruindo poros e promovendo a redução da condutividade hidráulica. Isto resulta em suscetibilidade à erosão “superficial” (laminar) e, conseqüentemente, perdas de nutrientes e água do sistema de produção, reduzindo a fertilidade do solo e o potencial produtivo da área agrícola (TAVARES FILHO, 1987).

Costa et al. (2004) não verificaram aumento na dispersão da argila, apesar do aumento do potencial elétrico superficial do solo. Concluíram que isso pode ser devido aos teores de carbono orgânico total e de Ca e Mg na camada superficial do solo. Por sua vez, o aumento da concentração de Ca e Mg atua na floculação das partículas de argila carregadas negativamente através do mecanismo de pontes de cátions. Estes resultados foram observados também por Albuquerque et al. (2000); Castro Filho e Logan (1991). Marciano (1999) também obteve decréscimo da argila dispersa utilizando doses de lodo de esgoto.

Paiva et al. (2000) observaram que o elevado grau de dispersão de argila (55%), para o horizonte Ap do Latossolo Amarelo argissólico, pode ser resultante

de cargas negativas geradas pela matéria orgânica, que influenciam na repulsão dos colóides do solo. Gupta, Bhumbla e Abrol (1984) demonstraram que a adição de substâncias húmicas aumentou a dispersão das argilas dos solos estudados. Segundo os autores, existe a possibilidade das substâncias húmicas atuarem diminuindo o ponto de carga zero (PCZ) do sistema.

Costa et al. (2004) verificaram que os maiores teores de matéria orgânica e cátions divalentes (Ca e Mg) atuaram na minimização do efeito dispersivo da calagem em solos de carga variável

### *Influência do lodo de esgoto na produtividade das culturas*

A maior disponibilidade de nutrientes no solo decorrente da aplicação de lodo de esgoto pode levar a um melhor desenvolvimento da planta e conseqüentemente maior produtividade das culturas. Entretanto, em função da composição do lodo, nem sempre é mantido o equilíbrio adequado entre os diferentes nutrientes, de modo que, mesmo havendo aumento na disponibilidade de alguns nutrientes, a planta poderá não responder (MELO; MARQUES, 2000). Rocha (1998) reitera esta conclusão não considerando o lodo de esgoto como um fertilizante orgânico substituto da adubação convencional, mas que este deve ser visto como um complemento desta adubação, no sentido de reduzir a utilização de fertilizantes químicos e, com isto, reduzir o custo da adubação. Mesmo assim, alguns autores, como Mostaghini, Matochia e Crenshaw (1988) e Adamu et al. (1989), consideram o lodo de esgoto como um fertilizante potencial para diversas condições de clima e solo.

Algumas pesquisas demonstram que a incorporação do lodo de esgoto aumentou em 20 a 50% a produtividade de diferentes culturas (BISCAIA; MIRANDA, 1996; PEREIRA et al., 1997; BARBOSA; TAVARES FILHO; FONSECA, 2002b). A EMATER-PR verificou aumentos de produção para o milho entre 30 e 77% em testes

controlados em pequenas propriedades (COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARANÁ, 1997).

O efeito do lodo de esgoto na produtividade vem sendo avaliado em diversas condições, doses, tipo de material, solo e culturas. A aplicação do lodo proporcionou aumento na produção de matéria seca (BETTIOL; CARVALHO; FRANCO, 1983; BERTON; CAMARGO; VALADARES, 1989) e na produtividade na cultura do milho (LOURENÇO; ANJOS; MEDRADO, 1996; BISCAIA; MIRANDA, 1996).

Favaretto et al. (1997), estudando doses crescentes de lodo de esgoto (32, 64 e 96 t ha<sup>-1</sup> em base úmida), concluíram que a adubação mineral recomendada para o milho foi responsável pela maior produção de grãos, mas não houve diferença em relação aos tratamentos que utilizaram o lodo. Ao contrário, para o crescimento vegetativo, constataram maiores médias nos tratamentos com lodo em relação à adubação mineral e a testemunha.

Oliveira et al. (1995) observaram aumento na produção de matéria seca de plantas de sorgo granífero com aplicação de lodo de esgoto de até 20 t ha<sup>-1</sup>. A aplicação de lodo, associada ou não à calagem (CaCO<sub>3</sub>), causou aumento na produção de matéria seca de milho em dois solos ácidos, mas o efeito foi maior na ausência de calagem (BERTON et al., 1997).

Andreoli (1999) trabalhando com lodo caledo em solos argilosos e arenosos no Paraná, observou maior produtividade do milho, em solos arenosos, quando a aplicação do lodo ocorreu antes do plantio da aveia (cultura implantada no inverno).

Silva, Resck e Sharma (2002) estudaram parcelas que receberam doses crescentes de lodo de esgoto (54, 108 e 216 t ha<sup>-1</sup> de lodo úmido) com e sem calcário e adubação mineral completa. Os resultados indicaram que a menor dose utilizada (54 t ha<sup>-1</sup>) teve efeito residual até o terceiro ano após a aplicação, com produtividade média de 4.700 kg de grãos de milho. Resultados semelhantes foram encontrados por Pereira Júnior et al. (1997).

Martins et al. (2003) utilizaram doses de 20, 40, 60 e 80 t ha<sup>-1</sup> (base seca) em dose única e parceladas e constataram que a produção de grãos e massa seca de milho aumentou com a adição de lodo de esgoto. Pedroza et al. (2003) avaliaram a aplicação de lodo nas doses de 2 a 12 t ha<sup>-1</sup> na cultura do algodoeiro, que respondeu favoravelmente com aumentos de produtividade.

Em experimentos utilizando doses de lodo de esgoto e adubação mineral, Deschamps e Favaretto (1997) observaram que o tratamento com adubação mineral apresentou maior média de produtividade, mas não houve diferença em relação aos tratamentos com lodo de esgoto na cultura do girassol. Na cultura do feijão, os autores também não verificaram diferença estatística entre os tratamentos com lodo e os tratamentos com adubação mineral. Lourenço, Anjos e Medrados (1996) obtiveram aumento de produtividade na cultura do feijão em função do uso de lodo de esgoto.

### *Recuperação de áreas degradadas*

Em solos degradados, em que se verifica a perda do horizonte orgânico, a principal fonte de carbono para utilização microbiana é a biomassa das plantas. Enquanto não se verifica a acumulação de matéria orgânica do solo, os níveis da atividade microbiana e o crescimento da vegetação permanecem em níveis baixos. A recuperação de áreas degradadas com a utilização de calagem e fertilização mineral pode renovar a vegetação, contudo as condições físicas e biológicas precárias podem resultar na deterioração da cobertura vegetal antes que se verifique a efetiva recuperação do solo (STROO; JENCKS, 1985).

A aplicação de lodo proporciona rápido estabelecimento e crescimento de gramíneas e leguminosas em áreas degradadas (SOPPER, 1993). Segundo o autor, nos tratamentos com lodo, as plantas se mostraram mais vigorosas com maior porcentagem de cobertura, maiores produtividades e melhor desenvolvimento do sistema radicular. Em locais em que a cultura não foi colhida, houve uma

grande reciclagem de nutrientes e conseqüente acúmulo de matéria orgânica.

Visser (1995) obteve melhora imediata nas condições químicas e físicas do solo, acelerando o estabelecimento das plantas e seu crescimento, considerando o lodo de esgoto como condicionador orgânico para recuperação do solo.

### Considerações Finais

Quando tratado e processado, o lodo recebe o nome de biossólido e adquire características que permitem sua utilização agrícola de maneira racional e ambientalmente segura, uma vez que contém nutrientes necessários às plantas (nitrogênio, fósforo e micronutrientes), apresenta teores variáveis de umidade e é rico em matéria orgânica, além de atuar como um condicionador do solo, melhorando a estrutura e o estado de agregação das partículas do solo.

A maior disponibilidade de nutrientes no solo decorrente da aplicação de lodo de esgoto pode levar a um melhor desenvolvimento da planta e conseqüentemente aumento da produtividade das culturas. Nesse sentido, o lodo pode ser visto como um complemento da adubação, podendo reduzir a utilização de fertilizantes químicos e, com isto, reduzir o custo da adubação.

Em relação à recuperação de áreas degradadas, a aplicação de lodo proporciona rápido estabelecimento e crescimento de gramíneas e leguminosas nessas áreas e as plantas tendem a se mostrar mais vigorosas, com maior porcentagem de cobertura, maiores produtividades e melhor desenvolvimento do sistema radicular.

É importante lembrar que o lodo de esgoto deve ser tratado antes de ser direcionado para uma disposição final. Dessa forma, a definição de políticas para a reciclagem agrícola do lodo de esgoto deve ser baseada em estudos que definam critérios agrônômicos, ambientais e sanitários, de modo a garantir sua utilização segura.

A reciclagem agrícola do lodo deve estar condicionada a regras que definam as exigências de qualidade do material a ser reciclado e aos cuidados exigidos para estabilização, desinfecção e normas de utilização que incluam as restrições de uso. Devem ser considerados alguns aspectos, tais como: condições do solo para o uso do lodo de esgoto, características das áreas para a aplicação do lodo, taxa de aplicação e cultura agrícola recomendada.

As limitações ambientais e edáficas para a aplicação do lodo e subprodutos em áreas agricultáveis objetivam minimizar os riscos de poluição dos solos e rios pelo seu transporte, lixiviação e escoamento superficial.

### Referências

- ADAMU, C. A.; BELL, P. F.; MULCHI, C.; CHARNEI, R. Residual metal concentration in soils and leaf accumulation in tobacco a decade following application of municipal sludge. *Journal of Environmental Quality*, Madison, v.56, p.113-126, 1989.
- ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; ERNANI, P. R.; FONTANA, E. C. Propriedades físicas e eletroquímicas de um latossolo Bruno afetadas pela calagem. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.24, p.295-300, 2000.
- ANDREOLI, C. V. *Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura e sua influência em características ambientais no agrossistema*. 1999. Tese (Doutorado em Meio Ambiente e Desenvolvimento) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- ANDREOLI, C. V.; PEGORINI, E. S. Gestão pública do uso agrícola do lodo de esgoto. In: \_\_\_\_\_. Impacto ambiental do uso do lodo de esgoto. Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000.
- \_\_\_\_\_. Reciclagem agrícola de biossólidos: impactos e regulamentação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., 2003, Ribeirão Preto. *Anais...* Ribeirão Preto: SBCS, 2003.
- ANDREOLI, C. V.; SPERLING, M. V.; FERNANDES, F. *Princípios do tratamento biológico de águas residuais*. Curitiba: FCO, 2001. v.6.
- BARBOSA, G. M. C.; TAVARES FILHO, J.; FONSECA, I. C. B. Avaliações de propriedades físicas de um latossolo vermelho eutroférrico tratado com lodo de esgoto por dois anos consecutivos. *Sanare*, Curitiba, v.17, n.17, p.94-101, 2002a.

- \_\_\_\_\_. Propriedades químicas de um Latossolo Vermelho eutroférico após aplicação por dois anos consecutivos de lodo de esgoto. *Acta Scientiarum*, Maringá, v.24, n.5, p.1501-1505, 2002b.
- \_\_\_\_\_. Condutividade hidráulica saturada e não saturada de latossolo vermelho eutroférico tratado com lodo de esgoto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.28, p.403-407, 2004.
- BERTON, R. S.; CAMARGO, O. A.; VALADARES, J. M. A. S. Absorção de nutrientes pelo milho em resposta à adição de lodo de esgoto a cinco solos paulistas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.13, p.187-192, 1989.
- BERTON, R. S.; CAMARGO, O. A.; VALADARES, J. M. A. S.; BATAGLIA, O. C. Peletização de lodo de esgoto e adição de CaCO<sub>3</sub> na produção de matéria seca e absorção de Zn, Cu e Ni pelo milho em três latossolos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.21, p.685-691, 1997.
- BETTIOL, W.; CARVALHO, P. C. T.; FRANCO, B. J. D. C. Utilização do lodo de esgoto como fertilizante. *O Solo*, Piracicaba, v.75, n.1, p.44-54, 1983.
- BISCAIA, R. C. M.; MIRANDA, G. Uso do lodo de esgoto calado na produção de milho. *Sanare*, Curitiba, v.5, p.86-89, 1996.
- BOTTEGA, J. C.; NASCIMENTO, E. B. Utilização do lodo de esgoto em pequenas propriedades agrícolas. In: ANDREOLI, C. V.; LARA, A. I.; FERNANDES, F. (Orgs). *Reciclagem de biossólidos: transformando problemas em soluções*. Curitiba: SANEPAR/FINEP, 1999.
- BRADY, N.C. *The nature and properties of soils*. 7. ed. Rio de Janeiro: F. Bastos, 1989.
- CASTRO FILHO, C.; LOGAN, T. J. Liming effects on the stability and erodibility of some Brazilian oxisols. *Journal Soil Science Society Of America*, Madison, v.55, p.1407-1413, 1991.
- COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARANÁ. *Manual técnico para utilização agrícola do lodo de esgoto no Paraná*. Curitiba: SANEPAR, 1997.
- COSTA, F. S.; BAYER, C.; ALBUQUERQUE, J. A.; FONTOURA, S. M. V. Calagem e as propriedades eletroquímicas e físicas de um latossolo em plantio direto. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.34, n.1, p.281-284, jan./fev. 2004.
- DA ROSS, C. O.; AITA, C.; CERETTA, C. A.; FRIES, M. R. Lodo de esgoto: efeito imediato no milheto e residual na associação aveia-ervilhaca. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.17, p.257-261, 1993.
- DESCHAMPS, C.; FAVARETTO, N. Efeito do lodo de esgoto complementado com fertilidade mineral na produtividade e desenvolvimento da cultura de feijoeiro e do girassol. *Sanare*, Curitiba, v.8, n.8, p.33-38, 1997.
- EPSTEIN, E.; TAYLOR, J. M.; CHANEY, R. L. Effects of sewage sludge and sludge compost applied to soil on some soil physical and chemical properties. *Journal of Environmental Quality*, Madison, v.5, n.4, p.422-426, 1976.
- FASSBENDER, H. W. *Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina*. San José, Costa Rica: IICA, 1984.
- FAVARETTO, N.; DESCHAMPS, C.; DAROS, E.; PISSAIA, A. Efeito do lodo de esgoto na fertilidade do solo e no crescimento e produtividade de milho (*Zea mays* L.). *Arquivos de Biologia e Tecnologia*, Curitiba, v.40, n.4, p.837-848, 1997.
- FERNANDES, F.; PIERRO, A. C.; YAMAMOTO, R. Y. Produção de fertilizante orgânico por compostagem do lodo gerado por estações de tratamento de esgotos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.28, n.5, p.564-574, 1993.
- FERNANDES, F. *Levantamento das produções e plano básico para a gestão do lodo de esgoto gerado pela Sanepar*. Curitiba: SANEPAR, 1998. (Relatório Técnico).
- \_\_\_\_\_. Estabilização e higienização de biossólidos. In: *Impacto ambiental do uso do lodo de esgoto*. Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000.
- FERNANDES, F.; ANDRAUS, S.; ANDREOLI, C. V.; BONNET, B. R. P.; BORGES, J. C.; MEDEIROS, M. L. B. Eficiência dos processos de desinfecção do lodo da ETE-Belém com vistas ao seu uso agrícola. *Sanare*, Curitiba, v.5, n.5, p.68-75, 1996.
- FERREIRA, A. C.; ANDREOLI, C. V.; JÜRGENSEN, D. *Produção e características dos biossólidos*. In: \_\_\_\_\_. *Uso e Manejo do lodo de esgoto na agricultura*. Rio de Janeiro: PROSAB, 1999.
- FIEST, L. C.; ANDREOLI, C. V.; MACHADO, M. A. M. Efeitos da aplicação do lodo de esgoto nas propriedades físicas do solo. *Sanare*, Curitiba, v.9, n.9, p.48-57, 1998.
- GOLDBERG, S.; FORSTER, H. S. Flocculation of reference clays and arid-zone soil clays. *Journal Soil Science Society of America*, Madison, v.54, p.714-718, 1990.
- GUPTA, S. C.; DOWDY, R. H.; LARSON, W. E. Hydraulic and thermal properties of a sandy soil as influenced by incorporation of sewage sludge. *Journal Soil Science Society of America*, Madison, v.41, p.601-605, 1977.
- GUPTA, S. C.; DOWDY, R. H.; LARSON, W. E.; BHUMBLA, D. K.; ABROL, U. P. Effect of sodicity, pH, organic matter and calcium carbonate on the dispersion behavior of soils. *Soil Science*, Baltimore, v.137, p.245-251, 1984.

- HARIDASAN, M.; CHIBBER, R. K. Effect physical and chemical properties on the erodibility of some soils of the Malwa Plateau. *Journal Of The Indian Society Of Soil Science*, New Delhi, v.19, p.293-298, 1971.
- JORGE, J. A.; CAMARGO, O. A.; VALADARES, J. M. A. S. Condições físicas de um latossolo vermelho-escuro 4 anos após aplicação de lodo de esgoto e calcário. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.15, n.237-240, 1991.
- KIEHL, J. C. *Manual de edafologia*. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979.
- KOENIGS, F. F. R. *The mechanical stability of clay soil as influenced by the moisture condutions and some factors. 1961. Thesis*. Wageningen Hol Centrum voor Landbouwpublikaties en landbouwdocumentatie.
- LOGAN, T. J.; CHANEY, R. L. Metals. In: PAGE, A. L.; GEASON, T. L.; SMITH, J. E.; ISKANDAR, J. K.; SOMMERS, L. E. (Ed.). *Utilization of municipal wastewater and sludge on land*. California: University of California, 1984. p.235-326.
- LOURENÇO, R. S.; ANJOS, A. R. M.; MEDRADO, M. J. S. Efeito do lodo de esgoto na produtividade de milho e feijão no sistema de produção de bracinga. *Sanare*, Curitiba, v.5, p.90-92, 1996.
- MARCIANO, C. R. *Incorporação de resíduos urbanos e as propriedades físico-hídricas de um Latossolo Vermelho-Amarelo*. 1999. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- MARCIANO, C. R.; MORAES, S. O.; OLIVEIRA, F. C.; MATIAZZO, M. E. Efeito do lodo de esgoto e do composto de lixo urbano sobre a condutividade hidráulica de um Latossolo Amarelo saturado e não saturado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.25, p.1-9, 2001.
- MARQUES, M. O. *Incorporação de lodo de esgoto em solo cultivado com cana-de-açúcar*. 1997. Tese (Livredocência) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal.
- MARTINS, A. L. C.; BATAGLIA, O. C.; CAMARGO, O. A.; CANTARELLA, H. Produção de grãos e absorção de Cu, Fé, Mn e Zn pelo milho em solos adubados com lodo de esgoto, com e sem calcário. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.27, p.563-574, 2003.
- MATTHEWS, P. Sustainability in biosolids management. *Water Science Technology*, Oxford, v.38, p.97-102, 1998.
- MELO, W. J.; MARQUES, M. O. Potencial do lodo de esgoto como fonte de nutrientes para as plantas. In: \_\_\_\_\_. *Impacto ambiental do uso do lodo de esgoto*. Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000.
- MELO, W. J.; MARQUES, M. O.; SANTIAGO, G. Efeito das doses crescentes de lodo de esgoto sobre frações da matéria orgânica e CTC de um Latossolo cultivado com cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.18, p.449-455, 1994.
- MOSTAGHINI, S.; MATOCHIA, J. E.; CRENSHAW, C. C. Effects of sewage sludge on iron chlorosis and yield of grain sorghum grown on calcareous soils. *Journal Of Plant Nutrition*, New York, v.11, p.1397-1415, 1988.
- NEIVA, M. R. Reciclagem agrícola de biossólidos da ETE Cetrel – uma experiência ambientalmente correta. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA AMBIENTAL, 20., 1999, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: ABES, 1999. p.477-479.
- OLIVEIRA, F. C.; MARQUES, M. O.; BELLINGIERI, P. A.; PERECIN, D. Lodo de esgoto como fonte de macronutrientes para a cultura do sorgo granífero. *Scientia Agrícola*, Piracicaba, v.52, n.2, p.360-367, maio/ago., 1995.
- OLIVEIRA, F. C.; MATTIAZZO, M. E.; MARCIANO, C. R.; ROSSETTO, R. Efeitos de aplicações sucessivas de lodo de esgoto em um Latossolo Amarelo distrófico cultivado com cana-de-açúcar: carbono orgânico, condutividade elétrica, pH e CTC. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.26, p.505-519, 2002.
- PEREIRA JÚNIOR, A. B.; VALIM, M. C. A.; SOUZA, J. L.; GONÇALVES, R. F. Utilização de lodo gerado em processo anaeróbio tipo tanque Imhoff como insumo agrícola para a cultura de milho (zea mays L.). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 19., Foz do Iguaçu, 1997. *Anais...* Foz do Iguaçu: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1997.
- POGGIANI, F.; GUEDES, M. C.; BENEDETTI, V. Aplicabilidade de biossólidos em plantações florestais: I. reflexo no ciclo dos nutrientes. In: BETIOL, W.; CAMARGO, O. A. (Ed.). *Impacto ambiental do uso do lodo de esgoto. Jaguariúna*: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000.
- RAIJ, B. *Fertilidade do solo e adubação*. São Paulo: IAC, 1991.
- ROCHA, T. R. *Utilização de lodo de esgoto na agricultura: um estudo de caso para as bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá*. 1998. Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade Estadual de São Paulo, Piracicaba.
- SILVA, F. C.; BOARETTO, A. E.; BERTON, R. S. Características agrotecnológicas, teores de nutrientes e de metais pesados em cana-de-açúcar (soqueira), cultivada em solo adubado com o lodo de esgoto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS DO SOLO, 25., 1995, Viçosa. *Anais...* Viçosa: SBCS/UFV, 1995. p.2279-2287.

- SILVA, F. C.; BOARETTO, A. E.; BERTON, R. S.; ZOTELLI, H. B.; PEXE, C. A.; MENDONÇA, E. Cana-de-açúcar cultivada em solo adubado com lodo de esgoto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.33, n.1, p.1-8, 1998.
- SILVA, J. E.; RESCK, D. V. S.; SHARMA, R. D. Alternativa agrônômica para o biossólido: a experiência de Brasília. In: \_\_\_\_\_. *Impacto ambiental do uso do lodo de esgoto*. Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000.
- \_\_\_\_\_. Alternativa agrônômica para o biossólido produzido no Distrito Federal: efeito na produção de milho e na adição de metais pesados em Latossolo no cerrado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.26, p.487-495, 2002.
- SOPPER, W. E. *Municipal sludge use in land reclamation*. New York: Lewis, 1993.
- STEVENSON, F. J. *Humus chemistry: genesis, composition, reactions*. New York: J. Wiley & Sons, 1982.
- STROO, H. F.; JENCKS, E. M. Effect of sewage sludge on microbial activity in an old, abandoned minesoil. *Journal of Environmental Quality*, Madison, v.14, n.3, p.301-304, 1985
- TAVARES FILHO, J. O papel das características e propriedades físicas nas perdas de solo-água e nutrientes por erosão devido ao cultivo do solo. *Semina*, Londrina, v.8, p.42-44, 1987.
- TSUTIYA, M. T. Tecnologia emergentes para a disposição final de biossólidos das estações de tratamento de esgotos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 20., 1999, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1999a. p.762-770.
- UEHARA, G. Mineralo-chemical properties of oxisols. In: INTERNATIONAL SOIL CLASSIFICATION WORKSHOP, 2., 1978, Malaysia. *Anais...* Bangkok: Soil Survey Division, Land Development Department, 1979. Part I, p.45-60.
- UNITED STATES Environmental Protection Agency. 40 CFR - Parts 503. final rules: standards for the use of sewage sludge. *Federal Register*, Washington, v.58, p.9248-9415, 1993.
- VISSER, S. Management of microbial processes in surface mined land reclamation in western Canadá. In: TATE, R. L.; KLEIN, D. A. *Soil reclamation processes*. New York: M. Dekker, 1995. p.203-341.
- WEBBER, M. D. Diretrizes para aplicação de lodo no solo. In: CURSO DE AVALIAÇÃO DE RISCO NO GERENCIAMENTO DO LODO DE ESGOTO, São Paulo, 1998. Convênio CANADÁ/SABESP/CETESB.