

RICARDO BEZERRA HOFFMANN

**POTENCIAL DE USO DE BIOSSÓLIDO PARA FINS DE
RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS**

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

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2012

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

H711p
2012

Hoffmann, Ricardo Bezerra, 1979-

Potencial de uso de biossólido para fins de recuperação de áreas degradadas / Ricardo Bezerra Hoffmann. – Viçosa, MG, 2012.

ix, 82f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Inclui apêndice.

Orientador: Raphael Bragança Alves Fernandes.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Solos - Manejo. 2. Física do solo. 3. Ciência do solo.
4. Humus. 5. Áreas degradadas - Recuperação.

I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 22. ed. 631.4

RICARDO BEZERRA HOFFMANN

**POTENCIAL DE USO DE BIOSSÓLIDO PARA FINS DE
RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS**

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

APROVADA: 30 de abril de 2012.



Maurício Paulo Ferreira Fontes
Coorientador



Clarice de Oliveira



Ana Augusta Passos Rezende



Emanuelle Mercês Barros Soares



Raphael Bragança Alves Fernandes
Orientador

OFEREÇO

A Deus,

Pai todo poderoso que nos momentos de angústia é o meu refúgio e a minha fortaleza que ilumina nossos caminhos, nos protegendo e nos dando sabedoria e força para vencer os obstáculos;

Aos meus pais,

Valdir Hoffmann e Lucinda Bezerra Hoffmann, exemplos de perseverança, trabalho, honestidade, dedicação, fé e amor;

As minhas irmãs e meu irmão,

Rúbia Hoffmann Ruckert, Susana Hoffmann, Isabel Hoffmann e Eduardo Bezerra Hoffmann, bem como aos meus cunhados Claison Ruckert e Fernando Guedes, ao meu sobrinho Johann Hoffmann Ruckert e a minha afilhada Manuela Hoffmann Guedes por todo carinho;

Aos meus avós,

Herbert Hoffmann (*in memorian*)

Ida Ferreira Hoffmann (*in memorian*)

Lindolfo Bezerra (*in memorian*)

Antônia Corrêa Bezerra (*in memorian*)

As verdadeiras amizades,

Em especial, Eliziane Luiza Benedetti, Delmar Santim, Edivânia Duarte e Bárbara Elias dos Reis, pelo prazer de todos os momentos que passamos juntos.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus pelas virtudes concedidas e por estar presente em todos os momentos da minha vida.

Aos meus familiares, pelo amor, carinho e compreensão.

A Universidade Federal de Viçosa e ao Programa de Pós Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, pela oportunidade de realização deste curso.

Ao professor Raphael Bragança Alves Fernandes pela amizade, confiança, orientação e conclusão deste trabalho.

Aos estagiários Moacir, Paulo, Guilherme, Allana e Dayane pelo comprometimento.

Aos avaliadores deste trabalho por todas as contribuições, em especial a minha amiga e ex-orientadora, profa. Clarice de Oliveira, que desde a graduação confiou no meu trabalho.

Aos professores do Departamento de Solos pelos conhecimentos transmitidos.

A CAPES, CNPq e a FAPEMIG pelo auxílio financeiro durante a realização desse trabalho.

Ao Magnífico Reitor, prof. Marcelo Minghelli, e ao Diretor Geral do *Campus* Xapuri, prof. Sérgio Flórido da Costa Guimarães pelas liberações para conclusão deste trabalho.

Aos meus amigos, em especial Maria do Socorro Viana do Nascimento, Eliana Pereira de Oliveira, Maralina Torres da Silva, Fabiana Aparecida Tobias Souza, Edivânia Duarte, Eliziane Luiza Benedetti, Delmar Santim e Rogério Batista da Costa pelo grande vínculo de afeto, amizade, sinceridade e companheirismo.

A secretária do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, Luciana Castro por todo atendimento e compreensão.

Aos laboratoristas Brás, Lula, Cláudio, Carlos e Carlinhos pelo auxílio na realização das análises físicas e químicas realizadas nesse trabalho.

A todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

RICARDO BEZERRA HOFFMANN, filho de Valdir Hoffmann e Lucinda Bezerra Hoffmann, nasceu em Rio do Sul, SC, em 31 de agosto de 1979.

Graduou-se em Licenciatura em Ciências Agrícolas pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro em maio de 2004.

Obteve certificado de especialização em Solos e Meio Ambiente pela Universidade Federal de Lavras em dezembro de 2006.

Em março de 2006 ingressou no Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Área de Concentração em Solos e Nutrição de Plantas, em nível de mestrado, do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Paraíba.

Em março de 2008 ingressou no Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, em nível de doutorado, na Universidade Federal de Viçosa.

Em junho de 2010 foi aprovado em concurso público, no cargo de professor da carreira do magistério de ensino básico, técnico e tecnológico do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Acre, onde ocupou os cargos de Diretor de Ensino, Pesquisa e Extensão do Campus Xapuri e Diretor Geral do Campus Sena Madureira, ocupando, atualmente, o cargo de Pró-Reitor de Ensino.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO	vi
ABSTRACT	viii
INTRODUÇÃO GERAL.....	1
REVISÃO DE LITERATURA.....	3
REFERÊNCIAS.....	9
 CAPÍTULO 1	
REGENERAÇÃO DA COBERTURA VEGETAL E QUALIDADE DO SOLO EM RESPOSTA À DISPOSIÇÃO DE BIOSSÓLIDO EM ÁREA DEGRADADA	14
 RESUMO	15
ABSTRACT	16
1. INTRODUÇÃO.....	17
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	19
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	22
4. CONCLUSÕES.....	32
5. REFERÊNCIAS.....	32
 CAPÍTULO 2	
DINÂMICA DA MATÉRIA ORGÂNICA EM SOLO DE ÁREA DEGRADADA APÓS APLICAÇÃO DE BIOSSÓLIDO	35
 RESUMO	36
ABSTRACT	37
1. INTRODUÇÃO.....	38
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	39
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	43
4. CONCLUSÃO.....	57
5. REFERÊNCIAS.....	57
 CAPÍTULO 3	
EMISSÃO DE CO₂ DE AMOSTRAS DE SOLO DE ÁREA DEGRADADA EM RESPOSTA A ADIÇÃO DE BIOSSÓLIDO	60
 RESUMO	61
ABSTRACT	62
1. INTRODUÇÃO.....	63
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	64
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	69
4. CONCLUSÃO.....	74
5. REFERÊNCIAS.....	74
 CONCLUSÕES GERAIS.....	78
APÊNDICE.....	79

RESUMO

HOFFMANN, Ricardo Bezerra, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2012. **Potencial de uso de biossólidos para fins de recuperação de áreas degradadas.** Orientador: Raphael Bragança Alves Fernandes. Coorientadores: Maurício Paulo Ferreira Fontes, Nerilson Terra Santos e Eduardo de Sá Mendonça.

Os biossólidos são produtos orgânicos originados a partir do sistema de tratamento de esgotos, e que possuem na sua constituição matéria orgânica e nutrientes, o que os qualifica como insumos alternativos para uso em recuperação de áreas degradadas. Neste contexto, o objetivo desse trabalho foi avaliar o emprego de biossólidos na recuperação de solos de áreas degradadas. Ensaio de campo e de casa de vegetação foram conduzidos. No campo, em solo degradado, foram montadas 20 parcelas, que receberam aplicação de cinco doses (0, 50, 100, 200 e 400 t ha⁻¹) de biossólido, com quatro repetições. Aos 30, 90, 180, 270 e 360 dias, amostras foram coletadas para a avaliação da densidade do solo (Ds) e de partículas (Dp), micro (Mi), macro (Ma) e porosidade total (Pt) do solo, estabilidade de agregados (DMG e DMP), argila dispersa em água (ADA), condutividade hidráulica (CH), teor de carbono orgânico (C) e nitrogênio (N) total, nitrato, amônio, teores de C e N da biomassa microbiana, quantidade e teores de C e N da matéria orgânica leve, teores de C e N das substâncias húmicas e a regeneração da cobertura vegetal. Adicionalmente, amostras das parcelas foram coletadas para a avaliação da evolução de C-CO₂ em laboratório. Em casa de vegetação, amostras de três solos representativos do Distrito Federal (Latossolo Vermelho Amarelo, Latossolo Vermelho e Cambissolo Háplico) foram dispostas em colunas de PVC e receberam as mesmas doses de biossólido do experimento de campo, e a evolução de C-CO₂ foi avaliada regularmente por cinco meses. Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância, seguida de análise de regressão, a 10 % de probabilidade. As doses de biossólido não afetaram, no período de um ano, os valores de Pt, Mi, Ma, DMP, DMG e ADA, mas proporcionaram diferenças nos teores de carbono orgânico no solo e nos valores de Ds, Dp e CH. A partir de 50 dias, a cobertura vegetal foi incrementada com a incorporação de biossólido ao solo. O C e N totais da biomassa microbiana e da matéria orgânica leve no solo responderam ao incremento das doses de biossólido; o nitrato e amônio tiveram seus teores reduzidos com o passar do tempo e, a humina foi a fração que mais acumulou C e N. Diferenças na evolução de C-CO₂ foram observadas em

resposta às doses de biossólido aplicadas e incorporadas em condição de campo em todos os períodos avaliados. No experimento de casa de vegetação, as doses incorporadas também provocaram aumento na evolução de C-CO₂ em todas as classes de solo analisadas, sem grandes diferenças entre elas, tendo em vista a homogeneidade de granulometria (< 4 mm) utilizada nas colunas. De uma forma geral, a aplicação de biossólidos incrementou a regeneração da cobertura vegetal do solo da área degradada, proporcionou ganhos nos teores de C e N do solo, não influenciando as características físicas analisadas, mas promovendo o aumento da evolução de CO₂.

ABSTRACT

HOFFMANN, Ricardo Bezerra, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, March 2012. **Potential use of biosolids for the restoration of degraded areas.** Advisor: Raphael Bragança Alves Fernandes. Co-advisors: Maurício Paulo Ferreira Fontes; Nerilson Terra Santos and Eduardo de Sá Mendonça.

Biosolids are organic products originating from treatment systems of sewage sludge that contain organic matter and nutrients, indicating them as alternative inputs for use in land restoration. The objective of this study was to evaluate the use of biosolids in the restoration of degraded areas. Experiments were carried out under field and greenhouse conditions. In the field, five biosolids rates (0, 50, 100, 200, and 400 t ha⁻¹) were applied to 20 plots of degraded soil, in four replications. After 30, 90, 180, 270, and 360 days, samples were collected to assess the soil bulk density (BD); particle density (PD); micro- (Mi) and macroporosity (Ma); total porosity (TP); aggregate stability (MGD and MWD); water-dispersible clay (WDC); hydraulic conductivity (HC); total C and N content; nitrate; ammonium; microbial biomass C and N; C and N quantity and content of light organic matter; C and N contents of humic substances; and regeneration of vegetation. Additionally, soil of the plots was sampled to assess the CO₂-C evolution in a laboratory. In a greenhouse, samples of three representative soils of the Federal District (Red Yellow Latosol, Red Latosol and Haplic Cambisol) were filled in PVC columns and treated with the same biosolids rates as in the field experiment, and the CO₂-C evolution was evaluated regularly for five months. The data were subjected to analysis of variance, followed by regression analysis, at 10% probability. After a period of one year, the biosolids rates had not affected the values of TP, Mi, Ma, MWD, MGD, and WDC, whereas the stocks of soil organic carbon and values of BD, PD and HC were altered. Fifty days after incorporation of biosolids into the soil, increased growth of the plant cover was stated. The total C and N microbial biomass and light organic matter in soil responded positively to increasing biosolids rates; ammonium nitrate levels decreased over time; and the humin fraction accumulated most C and N. Differences in CO₂-C evolution in response to the biosolids rates applied and incorporated under field conditions were observed after all periods. In the greenhouse experiment, the incorporated rates also caused an increase in CO₂-C evolution from all soil types,

without major differences, in view of the homogeneous particle size (<4 mm) in the columns. In general, biosolids applications promoted restoration of the soil cover of the degraded area, increases in soil C and N stocks, increases in CO₂- evolution, but no alterations in the physical properties analyzed.

Key words: sewage sludge, organic matter, restoration of degraded areas

INTRODUÇÃO GERAL

No último século, nosso planeta tem sido palco de uma explosão considerável de crescimento demográfico associado ao incremento do grau de industrialização e urbanização da sociedade. Isto ocorreu de forma acentuada e crescente, principalmente, ao longo das últimas décadas, acarretando um aumento contínuo no volume de resíduos gerados. A disposição adequada desses resíduos, de forma responsável para com a proteção do meio ambiente e de forma harmônica com as atividades econômicas é um dos grandes desafios a serem enfrentados pelos diferentes segmentos da sociedade, na busca do almejado desenvolvimento sustentável e da preservação da qualidade ambiental.

A disposição no solo dos biossólidos de lodo de esgoto sanitário ainda é assunto controverso na área ambiental brasileira, ainda que já exista disciplinamento legal que defina critérios e procedimentos para tal uso. Em vários países do mundo, este tipo de disposição é encarado com menos preocupação, obviamente desde que devidamente acompanhada de supervisão técnica e programa de monitoramento. Existe expectativa por parte das empresas brasileiras de saneamento público que a Resolução 375/2006 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) seja revisada nos próximos anos, uma vez que é considerada restritiva quando comparada com normas, por exemplo, de países europeus. Neste contexto, trabalhos de pesquisa envolvendo esses materiais são e serão relevantes para embasar futuras decisões que possam vir a ser tomadas.

Uma alternativa para o uso mais seguro do biossólido de lodo de esgoto pode ser sua aplicação em áreas de culturas não agrícolas. Neste contexto, esses resíduos podem apresentar-se como importantes insumos na recuperação de áreas degradadas, principalmente, por seu elevado teor de matéria orgânica e elevada capacidade de retenção de água. Os impactos esperados dessa aplicação nessas áreas degradadas são a melhoria da estrutura e fertilidade do solo, fundamentais para a recomposição da paisagem.

A recuperação de áreas degradadas a partir da revegetação natural ou pelo reflorestamento associada à aplicação do biossólido apresenta vantagem em relação à utilização desses resíduos em outras culturas agrícolas ou não, principalmente,

considerando o fato de que grande parte dessas áreas é distante de núcleos urbanos, com acesso restrito a pessoas e animais.

A crescente produção de biossólidos de lodo de esgoto no país merece ser acompanhada de incrementos na produção de dados e *know-how* por parte da comunidade acadêmico-científica. Incrementar o nível de conhecimento acerca da dinâmica pós-aplicação desses materiais pode permitir garantir melhor embasamento para futuras tomadas de decisão referentes à disposição final desses resíduos que, seguramente serão precedidas de consultas às instituições de pesquisa do país.

REVISÃO DE LITERATURA

A partir do último século, nosso planeta tem vivenciado um considerável crescimento demográfico associado a um incremento marcante do grau de industrialização e urbanização, o que tem acarretado um aumento crescente dos resíduos gerados, dentre eles o biossólido.

O termo biossólido, como proposto pela WEF (Water Environmental Federation – Órgão Federal Americano – Alexandria/VA), é usado para denominar o lodo proveniente do tratamento de esgotos sanitários ou industriais, que tenha recebido algum tipo de estabilização biológica e que apresente uma composição predominantemente orgânica, podendo ter utilização benéfica (INGLESE, 1998; ANDREOLI e PEROGINI, 1998). Esse termo foi criado no final da década de 80 do século passado nos Estados Unidos, com o objetivo de se evitar o preconceito e atrair a atenção dos agricultores para o potencial agrícola do lodo de esgoto tratado (LUDUVICE, 1998).

A preocupação atual com os biossólidos tem sido associada ao grande volume produzido diariamente. No final do século passado, estimativas eram de que os quase 400 milhões de habitantes da Europa já produziam anualmente cerca de 7,5 milhões de toneladas (base seca) de biossólidos (FIGUEIREDO, 1997). Na mesma época, a produção de biossólidos dos EUA girava em torno de 5,3 milhões de toneladas (base seca) anuais, sendo gastos naquela oportunidade com o tratamento e gerenciamento desses materiais algo em torno de dois bilhões de dólares anuais (WEF, 1997). Posteriormente, foram freqüentes os relatos na literatura da prática usual de destinação desse tipo de produto para a agricultura (BETTIOL e CAMARGO, 2000; LUDUVICE, 2000; MELFI e MONTES, 2001).

No início desse século, a estimativa de produção de biossólidos no Brasil era menor se comparada aos países da Europa e Estados Unidos, atingindo cerca de pouco mais de 150.000 toneladas por ano de lodo seco (MACHADO, 2001). No entanto, dados recentes são de que somente no Distrito Federal sejam produzidas 400 toneladas de lodo por dia (EMBRAPA, 2007), o que indica a subestimativa do valor anteriormente indicado. Essa realidade revela que o lodo está entre os resíduos humanos de maior volume gerado pela humanidade e, dado seu potencial de causar impacto ambiental, deve merecer os devidos cuidados quanto a disposição.

Esse incremento na produção nacional de biofóssido está intimamente associado à ampliação nas taxas de saneamento básico verificada no país nos últimos anos. Com o aumento no volume de esgotos coletados nas cidades brasileiras e também com as pressões dos órgãos ambientais, em especial nos grandes centros, essas águas residuárias passaram a ser tratadas, gerando cada vez mais biofóssidos no processo de tratamento (COLODRO, 2005).

O termo biofóssido tem sido preferido à denominação lodo de esgoto, embora vários autores ainda usem ambos os termos como sinônimos. Segundo COSTA (2004), há divergências entre os pesquisadores em utilizar o nome lodo de esgoto ou biofóssido para seu uso agrícola. Para os que adotam a denominação original (lodo), isto permite que o produto continue a ser tratado como um resíduo, já os que preferem biofóssido, o fazem pela melhor imagem que o termo oferece, favorecendo assim sua maior aceitação pelo público. No entanto, o uso do termo biofóssido tem sido mais aceito para definir um subproduto do lodo de esgoto que foi adequadamente tratado e processado, com controle de qualidade do produto final obtido e com destinação para algum fim de uso benéfico e não somente descartado ou direcionado para incineração, ou aterros municipais e industriais.

Dentre os usos com potencial benéfico, a reciclagem agrícola desses resíduos tem se destacado. Essa reciclagem é considerada a forma mais difundida atualmente no planeta, em função do potencial que o resíduo apresenta como insumo agrícola e por constituir uma solução considerada como definitiva para o problema (ANDREOLI e PEGORINI, 2003).

Vários trabalhos de pesquisas já demonstraram a capacidade desses resíduos de favorecer a qualidade física e química de solos, uma vez que apresentam consideráveis teores de matéria orgânica e nutrientes, permitindo seu uso agrícola, com vantagens econômicas e ambientais para os agricultores e para a sociedade (AGGELIDES e LONDRA, 2000; SILVA et al., 2000, 2004; ANDREOLI et al., 2001; VAZ e GONÇALVES, 2002; SIMONETE et al., 2003; GALDOS et al., 2004; VIEIRA e SILVA, 2004; ABREU JÚNIOR et al., 2005; BARBOSA e TAVARES FILHO, 2006).

Efeito positivo do uso desse produto também foram relatos sobre as características biológicas dos solos, como no desenvolvimento de minhocas, que constituem componentes da fauna edáfica que desempenham importante papel no condicionamento das propriedades físicas do solo, em especial na aeração,

estimulando a respiração microbiana e o aumento do fluxo de CO₂ e O₂ e, dessa forma, favorecendo o crescimento e desenvolvimento vegetal (MELFI e MONTES, 2001).

Além das áreas agrícolas, outros usos do solo também foram avaliados quanto à aplicação de biossólidos. Por não estarem diretamente associados à produção de alimentos, os ecossistemas florestais plantados têm sido indicados como uma alternativa potencial para a disposição final do produto (VAZ e GONÇALVES, 2002). Tais áreas são consideradas adequadas para a ciclagem dos resíduos orgânicos provenientes dos centros urbanos, e ainda apresentam as vantagens de proporcionar produção de madeira para atender a demanda do mercado e também para a fixação de CO₂ (POGGIANI e BENEDETTI, 1999). Nesse contexto, TSUTIYA (2001) destaca os aspectos das florestas plantadas que poderiam ser considerados para sua recomendação como destino de biossólidos: alta capacidade de produção de biomassa, sistema radicular profundo e bem distribuído no solo, e elevada eficiência de aproveitamento dos nutrientes contidos no biossólido se comparadas a culturas de ciclo curto, as quais apresentam maior potencial de perdas de nutrientes por erosão e lixiviação.

Dados da SANEPAR (1997) indicam que as culturas mais recomendadas e com melhor resposta ao uso do biossólido são as gramíneas, como milho, trigo, cana e sorgo. Entretanto, outras aplicações como fruticultura, reflorestamento e recuperação de áreas degradadas também tem sido considerados, desde que dentro dos critérios legais específicos de utilização. Ressalva-se sob esse aspecto, que é vetado o uso do biossólido (mesmo higienizado) para a horticultura e demais produtos consumidos crus que tenham contato direto com o resíduo.

Quando o destino dos biossólidos é a agricultura, o conhecimento de sua composição química e biológica é de extrema importância visto que os materiais gerados nas estações de tratamento são bastante heterogêneos, em razão da qualidade do esgoto bruto, do processo utilizado no tratamento de esgotos, e dos processos de tratamento e condicionamento dos diversos tipos de lodos gerados (COMPARINI, 2001).

Na recuperação de áreas degradadas tem se verificado a aplicação de doses, em quantidades relativamente elevadas de biossólido. ROCHA e SHIROTA (1999) relatam para casos nos EUA que a aplicação chegou a atingir dosagens de até 495 t ha⁻¹. O valor da taxa de aplicação é variável, mas deve considerar a qualidade de

matéria orgânica e nutrientes presentes no biossólido e necessários ao solo, até que o ecossistema de autossustentação seja estabelecido. Uma taxa de aplicação típica nessas áreas degradadas gira em torno de 100 t ha⁻¹ de material seco (ZEITOUNI, 2005).

A aplicação de volumes elevados em apenas uma vez pode proporcionar vantagens e desvantagens. Como vantagem pode-se citar a economia de escala, com diminuição do custo de transporte e disposição e, como desvantagem, a possibilidade de contaminação das águas superficiais e subterrâneas e o comprometimento da área para usos futuros, o que parece ser razão suficiente para uma precaução em virtude da possível presença de poluentes, patógenos e até mesmo compostos orgânicos persistentes (ROCHA e SHIROTA, 1999). Esses componentes podem provocar a contaminação do solo, e conseqüentemente, impactos ambientais negativos. Dentre os poluentes, merecem destaque os metais pesados, e o nitrato que, embora nutriente, em doses aplicadas elevadas pode promover contaminação das áreas receptoras desses resíduos e se tornar um problema ambiental.

A contaminação por metais pesados em solos tratados com lodo de esgoto tem sido avaliada pela concentração total desses metais no sistema. No entanto, o fato do metal pesado estar presente no solo não significa que o mesmo esteja disponível pelas plantas, podendo permanecer por longos períodos sem ser absorvido em quantidades tóxicas (SIMONETE e KIEHL, 2002). Em solos tratados com biossólidos, a mobilidade de metais pesados tem sido apontada como nula ou muito baixa (EMMERICH et al., 1982; BAXTER et al., 1983; CHANG et al., 1984; WILLIAMS et al., 1980 e 1987, OLIVEIRA e MATTIAZZO, 2001). No entanto, a persistência desses elementos químicos no solo, a capacidade do solo em reter tais elementos, os níveis de ocorrência de contaminação já verificados, os fatores climáticos tropicais envolvidos e as altas taxas de degradação da carga orgânica dos biossólidos tem merecido a preocupação de vários autores (McBRIDE, 1995; CAMOBRECO et al., 1996; McBRIDE et al., 1997; MESQUITA, 2002) e órgãos de fiscalização ambiental. Por sua vez, OLIVEIRA et al. (2002) destacam que ainda existem muitas dúvidas a respeito da mobilidade dos metais pesados em solos de regiões tropicais, justificadas, em parte, pela carência de estudos de longo prazo, agravados pela tendência de grande mobilidade desses metais, já que nessas regiões predominam solos altamente intemperizados sob regimes de temperatura e precipitações pluviais elevadas.

Quando ocorre contaminação por metais pesados no solo, essa contaminação normalmente não se restringe apenas ao solo e ao local de aplicação, pois a possibilidade de movimentação vertical de diferentes frações e formas do material e de seus derivados podem alcançar os aquíferos subterrâneos. Nesse sentido, o movimento vertical e descendente desses contaminantes pelo perfil dos solos pode significar um grande problema para a sociedade contemporânea, em decorrência do crescente interesse (e necessidade) pela utilização de resíduos urbanos na agricultura (OLIVEIRA & MATTIAZZO, 2001). Dessa forma, este tema vem recebendo, nos últimos anos, maior atenção de pesquisadores, principalmente, no que se refere à mobilidade dos metais pesados (LUND et al., 1976; RITTER e EASTBURN, 1978; WILLIAMS et al., 1987; McBRIDE et al., 1997).

Embora seja o solo uma barreira natural de proteção aos aquíferos subterrâneos, os fatores que governam sua capacidade em reter elementos potencialmente tóxicos são extremamente complexos, o que dificulta sobremaneira o seu entendimento e as possibilidades de previsões acerca do comportamento desses elementos, principalmente a longo prazo (MESSIAS et al., 2007). Por outro lado, a maior ou menor mobilidade dos metais pesados será determinada pelas características do solo, como conteúdo original do metal, textura, teores e tipos de argila, pH, capacidade de troca de cátions, teor de matéria orgânica entre outros, que influenciarão as reações de adsorção, dessorção, precipitação, dissolução, complexação e oxirredução (OLIVEIRA e MATTIAZZO, 2001).

Com relação às doses de aplicação do bio sólido, Camargo e Bettiol (2000) indicam que a quantidade a ser aplicada ao solo deve ser tal que a quantidade de nitrato ou amônio advindos da mineralização da matéria orgânica presente no resíduo não exceda aquela que a planta tem a capacidade de absorver. Desta forma, evitar-se-ia que algum excesso fique em uma forma facilmente lixiviável, podendo contaminar corpos de água subterrâneos.

Tendo em vista o risco associado ao uso de lodo de esgoto, o Conselho Nacional de Meio Ambiente publicou a Resolução 375/2006 (CONAMA, 2006), que “estabelece os critérios e procedimentos, para o uso em áreas agrícolas do lodo de esgoto gerado em estação de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados”, visando benefícios à agricultura e para evitar riscos à saúde pública e ao meio ambiente. Essa norma legal define que os bio sólidos para terem aplicação agrícola devem ser previamente submetidos a algum tipo de processo de redução de

patógenos e de atratividade de vetores. Também determina quais culturas são aptas a receberem o resíduo, sendo proibida a utilização de qualquer classe de lodo ou produto derivado em pastagens e cultivo de olerícolas, tubérculos e raízes.

No entanto, outra possibilidade pode ser vislumbrada para a disposição final do bioestabilizado, como por exemplo, seu uso em áreas de uso não agrícola ou áreas com solos degradados. No setor de recuperação de áreas degradadas, a adição de material orgânico no solo revela-se como um importante fator para a definição do sucesso ou insucesso de determinados projetos. Além disso, por ser freqüente o emprego de culturas de ciclo longo nas áreas a serem recuperadas, a aplicação de bioestabilizados seria vantajosa em relação à adubação mineral, pelo fato de o produto apresentar uma taxa de degradação relativamente baixa (BARBOSA e TAVARES FILHO, 2006; SILVA, 2006), o que permite melhor sincronia entre a liberação dos nutrientes do lodo e seu uso pelo sistema radicular.

Outro efeito da aplicação desses resíduos é o incremento na emissão de gases causadores do efeito estufa, assunto muito discutido e centro de muitas preocupações na atualidade. Entretanto, trabalhos neste sentido ainda são escassos na literatura. Sob essa ótica, a disposição no solo de bioestabilizado, via reciclagem agrícola ou para a recuperação de áreas degradadas, passa a merecer atenção devido ao potencial de relação que pode ter com os fenômenos climáticos globais. A aplicação desse resíduo fornece ao solo matéria orgânica e nutrientes, o que incrementa os processos biológicos, podendo incrementar significativamente os fluxos de gases na interface solo-atmosfera. Estudos realizados em diferentes tipos de solos com outros objetivos, e sob diferentes condições ambientais e de manejo, comprovaram que as atividades agrícolas podem contribuir na emissão de gases do solo para a atmosfera (AKIYAMA et al., 2000; HADI et al., 2000, DAVIDSON et al., 2001; PASSIANOTO et al., 2004). Daí a natural preocupação com a disposição de resíduo de elevado teor de matéria orgânica no solo. O trabalho de Fernandes et al. (2005) é um dos poucos que trata especificamente desse assunto em solos tropicais. Os autores verificaram que a aplicação durante quatro anos de bioestabilizado em Latossolo Vermelho argiloso, em condições de campo, implicou no incremento das emissões dos gases CO₂, N₂O e CH₄ para a atmosfera, sendo assim, novos estudos sobre o tema tornam-se pertinentes.

O presente estudo parte da hipótese que a adição do bioestabilizado melhora o desenvolvimento de plantas cultivadas e a qualidade do solo, no que se refere às suas

características físicas, químicas e biológicas. Por outro lado, tal aplicação incrementa a presença de contaminantes no solo, favorece a movimentação vertical de nutrientes e contaminantes no perfil, e intensifica o fluxo de gases do efeito estufa para a atmosfera.

Diante do exposto, o objetivo geral deste trabalho é avaliar os efeitos da aplicação e incorporação de biossólidos na qualidade do solo e no desenvolvimento vegetal em áreas degradadas. Constituem objetivos específicos: avaliar, em condições de campo, o efeito da aplicação do biossólido sobre as propriedades físicas e químicas do solo, bem como sobre a regeneração da cobertura vegetal. Ainda, em campo e em casa de vegetação, objetivou-se também avaliar o efeito da aplicação do biossólido sobre o fluxo de CO₂ para a atmosfera.

REFERÊNCIAS

ABREU JUNIOR, C.H.; BOARETTO, A.E.; MURAOKA, T.; KIEHL, J.C. Uso agrícola de resíduos orgânicos: propriedades químicas do solo e produção vegetal. In: VIDAL-TORRADO, P.; ALLEONI, L.R.F.; COOPER, M.; SILVA, A.P.; CARDOSO, E.J. (Eds.). Tópicos em Ciência do Solo IV, Viçosa: SBCS, 2005. p.391-479.

AGGELIDES, S.M.; LONDRA, P. A. Effects of compost produced from town wastes and sewage sludge on the physical properties of a loamy and clay soil. *Bioresource Thecnology*, v.71, p.253-259, 2000.

AKIYAMA, H.; TSURUTA, H.; WATANABE, T. N₂O and NO emissions from soils after the application of different chemical fertilizers. *Chemosphere – Global Change Science*. v.2, p.313-320, 2000.

ANDREOLI, C.V.; PEGORINI, E.S. Gestão de biossólidos: Situação e perspectivas. In. Seminário sobre gerenciamento de biossólidos do Mercosul, 1, 1998. Anais. Curitiba, ABES, p.11-18, 1998.

ANDREOLI, C.V.; PEGORINI, E.S. Reciclagem agrícola de biossólidos: impactos e regulamentação. In: XXIX Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 2003, Ribeirão Preto. Anais... Ribeirão Preto: SBCS, 2003.

ANDREOLI, C.V., PEGORINI, E.S., FERNANDES, F. Disposição do lodo de esgoto no solo. In: ANDREOLI, C.V., Von SPERLING, M.; FERNANDES, F. (Coords.) Lodo de esgotos: tratamento e disposição final. DESA/UFGM, SANEPAR. v.6, p.319-395, 2001.

BARBOSA, G.M.C.; TAVARES FILHO, J. Uso agrícola do lodo de esgoto: influência nas propriedades químicas e físicas do solo, produtividade e recuperação de áreas degradadas. *Semina: Ciências Agrárias*, Londrina, v.27, p.565-580, 2006.

BAXTER, J.C.; AGUILAR, M.; BROWN, K. Heavy metals and persistent organics at a sewage sludge disposal site. *Journal of Environmental Quality*, v.12, p.311-316, 1983.

BETTIOL, W.; CAMARGO, O.A. Impacto ambiental do uso do lodo de esgoto. Jaguariúna, SP: Embrapa Meio Ambiente, 2000. 312p.

CAMARGO, O. A. de; BETTIOL, W. Agricultura: opção animadora para a utilização de lodo de esgoto. *O Agrônomo*, Campinas, v.52, n.2-3, p.13-16, 2000.

CAMOBRECO, V.J.; RICHARDS, B.K.; STEENHUIS, T.S.; PEVERLY, J.H.; McBRIDE, M.B. Movement of heavy metals through undisturbed and homogenized soil columns. *Soil Science*, v.161, p.740-750, 1996.

CHANG, A.C.; WARNEKE, J.E.; PAGE, A.L.; LUND, L.J. Accumulation of heavy metals in sewage sludge-treated soils. *Journal of Environmental Quality*, v.13, p.879, 1984.

COLODRO, G. Recuperação de solo de área de empréstimo com lodo de esgoto. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Agrícola – UNICAMP - Campinas, SP. 2005.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução N° 375/2006 - "Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências". 32p., 2006 Disponível em www.mma.gov.br/port/conama/res/res06/res37506.pdf. Consultado 13/10/2008.

COMPARINI, J.B. Engenharia de aplicação dos Biossólidos. In: TSUTIYA, T.; COMPARINI, J.B.; SOBRINHO, P.A.; HESPANHOL, I.; CARVALHO, P. de C. T. de.; MELFI, A. J.; MELO, W.J. de.; MARQUES, M.O. (Eds). *Biossólidos na Agricultura*. São Paulo: SABESP, 2001. 405-431p.

COSTA, F. O. Sistema Especializado como uma ferramenta para aplicação e controle de lodo de esgoto na agricultura. Campinas: IAC. 2004. 57p. (Dissertação de Mestrado).

DAVIDSON, E. A.; BUSTAMANTE, M. M. C.; PINTO, A. S. Emissions of nitrous oxide and nitric oxide from soils of native and exotic ecosystems of the Amazon and Cerrado regions of Brazil. *The Scientific World*. v.1, p.312-319. 2001.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Lodo de esgoto vira fertilizante nas culturas de soja e milho. Disponível em <http://www.embrapa.br/embrapa/imprensa/noticias/2007/marco/foldernoticia.2007-03-26.6950368216/noticia.2007-03-27.5882511657>. Consultado em 22/07/2008.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Manual de métodos de análise de solo. 2.ed. Rio de Janeiro, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212p.

EMMERICH, W.E.; LUND, L.J.; PAGE, A.L.; CHANG, A.C. Movement of heavy metals in sewage sludge-treated soils. *Journal of Environmental Quality*, v.11, p.174-178, 1982.

FERNANDES, S.A.P.; BETTIOL, W.; CERRI, C.C.; CAMARGO, P. Sewage sludge effects on gas fluxes at the soil-atmosphere interface, on soil $\delta^{13}\text{C}$ and on total soil carbon and nitrogen. *Geoderma*, v.125, p.49-57, 2005.

FIGUEIREDO, R.F. Reuso e Destino dos Biossólidos. Campinas: Faculdade de Engenharia Civil – UNICAMP, Dez. 1997. Relatório de visita ao Politécnico di Milano (não publicado).

GALDOS M.V, DE MARIA, I.C., CAMARGO, O.A. Atributos químicos e produção de milho em um Latossolo Vermelho eutroférico tratado com lodo de esgoto. Rev. Bras. Ci. Solo, v.28, p.569-577, 2004.

HADI, A.; INUBUSHI, K.; PURNOMO, F. R.; YAMAKAWA, K.; TSURUTA, H. Effect of land-use change on nitrous oxide (N₂O) emission from tropical peatlands. Chemosphere – Global Change Science. v.2, p.347-358, 2000.

INGLESE, J.L. Biosolidos: Conceptos fundamentais. In. Seminário sobre gerenciamento de biossólidos do Mercosul, 1, 1998. Anais, Curitiba, ABES, p.27-29, 1998.

LUDUVICE, M. Experiência da Companhia de Saneamento do Distrito Federal na reciclagem agrícola de biossólido. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, A.C. (Eds). Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto. Jaguariúna, SP: EMBRAPA Meio Ambiente, p.153-162. 2000.

LUDUVICE, M. Gestão de biossólidos e o Mercosul. In. Seminário sobre gerenciamento de biossólidos do Mercosul, 1, 1998. Anais. Curitiba, ABES, p.9-10, 1998.

LUND, L.J.; PAGE, A.L.; NELSON, C.O. Movement of heavy metals below sewage disposal ponds. Journal of Environmental Quality, v.5, p.330-334, 1976.

MACHADO, M. F. S. A situação brasileira dos biossólidos. Campinas: Faculdade de Engenharia Civil, Unicamp. 2001. 828p. (Dissertação de Mestrado).

McBRIDE, M.B. Toxic metal accumulation from agricultural use of sludge: are USEPA regulations protective? Journal of Environmental Quality, v.24, p.5-18, 1995.

McBRIDE, M.B.; RICHARDS, B.K.; STEENHUIS, T.; RUSSO, J.J.; SAUVÉ, S. Mobility and solubility of toxic metals and nutrients in soil fifteen years after sludge application. Soil Science, v.162, p.487-500, 1997.

MELFI, A. J., MONTES, C. R. Impacto dos biossólidos sobre o solo. In: TSUTIYA et al. Biossólidos na Agricultura. São Paulo: SABESP, 2001.

MESQUITA, A.A. Remediação de áreas contaminadas por metais pesados provenientes de lodo de esgoto. Seropédica: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2002. 68p. (Dissertação de Mestrado).

MESSIAS, A.S.; SILVA, H.A.; LIMA, V.N. de; SOUZA, J.E.G. de. Avaliação da mobilidade de micronutrientes em solo tratado com lodo de esgoto. Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional, v.3, n.3. p.193-211. 2007.

OLIVEIRA, F. C., MATTIAZZO, M. E. Mobilidade de metais pesados em um Latossolo amarelo distrófico tratado com lodo de esgoto e cultivado com cana-de-açúcar. Scientia Agricola, v.58, n.4, p.807-812, 2001.

OLIVEIRA, F. C., MATTIAZZO, M. M., MARCIANO, C. R., JUNIOR, C. H. A. Movimentação de metais pesados em Latossolo adubado com composto de lixo urbano. Revista de Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.37, n.12, p.1787-1793, 2002.

PASSIANOTO, C. C.; AHRENS, T.; FEIGL, B.; STEUDLER, A.; MELILLO, J. M.; DO CARMO, J. B. Diurnal changes in nitric oxide emissions from conventional tillage and pasture sites in the Amazon Basin: influence of soil temperature. *Plant and soil*. v.258, p.21-29, 2004.

POGGIANI, F.; BENEDETTI, V. Aplicabilidade do lodo de esgoto urbano em plantações de eucaliptos. *Silvicultura*, v.80, p.48-51, 1999.

RITTER, W.F.; EASTBURN, R.P. Leaching of heavy metals from sewage sludge through coastal plain soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v.9, p.785-798, 1978.

ROCHA, M. T., SHIROTA, R. Disposição final de lodo de esgoto. *Revista de Estudos Ambientais* v.1, n.3, p.1-24. 1999.

SANEPAR - COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARANÁ. Manual técnico para utilização agrícola do lodo de esgoto no Paraná. Curitiba: SANEPAR, 1997. 96p.

SILVA E. S., RESCK D. V. S., SHARMA R. D. Alternativa agrônômica para o biossólido: a experiência de Brasília I. Efeito na produção de milho e na adição de metais pesados em Latossolo no cerrado. *Rev. Bras. Ci. Solo*, v.26, p.487-495, 2000.

SILVA, P.H.M. Produção de madeira, ciclagem de nutrientes e fertilidade do solo em plantios de *Eucalyptus grandis*, após aplicação de lodo de esgoto., Piracicaba: USP/ESALQ. 2006. (Dissertação de Mestrado). 117p.

SILVA, W.D.; ALVES, M.C.; COLODRO, G. Estabilidade de agregados de um solo tratado com lodo de esgoto. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 15, 2004, Santa Maria, Anais... Santa Maria, 2004. 1 CD- ROM.

SIMONETE, M.A.; KIEHL, J.C. Extração e fitodisponibilidade de metais em resposta à adição de lodo de esgoto no solo. *Scientia Agrícola*, v.59, p.555-563, 2002.

SIMONETE, M.A.; KIEHL, J.C.; ANDRADE, C.A; TEIXEIRA C.F. Efeito do lodo de esgoto em um Argissolo e no crescimento e nutrição de milho. *Pesq. Agropec. Bras.*, v.38, n.10, p.1187-1195. 2003.

SOPPER, W.E. Municipal sludge use in land reclamation. New York: Lewis, 1993. 163p.

TSUTIYA, M. T. Alternativas de disposição final de biossólidos. In: TSUTIYA et al. *Biossólidos na Agricultura*. São Paulo: SABESP, p.132-180, 2001.

VAZ, L.M.S.; GONÇALVES, J.L.M. Uso de biossólidos em povoamento de eucalipto: efeito em atributos químico do solo, no crescimento e na absorção de nutrientes. *Rev. Bras. Ci. Solo*, v.26, p.747-758, 2002.

VIEIRA, R.F.; SILVA, C.M.M.S. Utilização de lodo de esgoto como fonte de fósforo na cultura da soja. Jaguariúna: Embrapa/CNPMA, 2004. p.1-3. (Circular Técnica).

WEF/US-EPA – Biosolids Fact Sheet Project. *Biosolids: A Short Explanation and Discussion*. EUA. 1997. 105p.

WILLIAMS, D.E.; VLAMIS, J.; PUKITE, A.H.; COREY, J.E. Metal movement in sludge-amended soils: a nine-year study. *Soil Science*, v.143, p.124-131, 1987.

WILLIAMS, D.E.; VLAMIS, J.; PUKITE, A.H.; COREY, J.E. Trace element accumulation, movement, and distribution in the soil profile from massive applications of sewage sludge. *Soil Science*, v.129, p.119-132, 1980.

ZEITOUNI, R.F. Análise Crítica da Norma CETESB P 4.230 – “Aplicação de Lodos de Sistemas de Tratamento Biológico em Áreas Agrícolas – Critérios Para Projeto e Operação”. Dissertação de Mestrado. Instituto Agronômico de Campinas, Campinas, São Paulo, 2005. 211p.

CAPÍTULO 1

REGENERAÇÃO DA COBERTURA VEGETAL E QUALIDADE DO SOLO EM RESPOSTA À DISPOSIÇÃO DE BIOSSÓLIDO EM ÁREA DEGRADADA

RESUMO

HOFFMANN, Ricardo Bezerra, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2012. **Regeneração da cobertura vegetal e qualidade do solo em resposta à disposição de biossólido em área degradada.** Orientador: Raphael Bragança Alves Fernandes. Co-orientadores: Maurício Paulo Ferreira Fontes; Nerilson Terra Santos e Eduardo de Sá Mendonça.

A partir do último século, nosso planeta tem vivenciado considerável crescimento demográfico associado ao incremento marcante do grau de urbanização, o que tem acarretado um aumento dos resíduos gerados, em especial dos biossólidos gerados nas estações de tratamento de esgoto sanitário. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o emprego de biossólidos na recuperação de solos de áreas degradadas. Na área de estudo foram montadas 20 parcelas, que receberam aplicação de cinco doses (0, 50, 100, 200 e 400 t ha⁻¹) de biossólido, com quatro repetições. Aos 30, 90, 180, 270 e 360 dias foram avaliadas a densidade do solo (Ds) e de partículas (Dp), micro (Mi), macro (Ma) e porosidade total (Pt) do solo, estabilidade de agregados (DMG e DMP), argila dispersa em água (ADA), condutividade hidráulica (CH), teor de carbono orgânico (CO) e a regeneração da cobertura vegetal. Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância, seguida de análise de regressão, a 10 % de probabilidade. As doses de biossólido não afetaram, no período de um ano, os valores de Pt, Mi, Ma, DMP, DMG e ADA, mas proporcionaram diferenças nos teores de carbono orgânico no solo e nos valores de Ds, Dp e CH. A partir de 50 dias, a cobertura vegetal foi incrementada com a incorporação de biossólido ao solo. A aplicação de biossólido demonstrou interferir pouco nas características físicas do solo, tendo em vista o pequeno período de avaliação. Entretanto, o efeito foi marcante nos teores de carbono e na regeneração da cobertura vegetal da área degradada, mesmo no pouco tempo de avaliação, o que permite indicar que o biossólido promoveu melhorias ao solo da área degradada.

Palavras chave: física do solo, cobertura vegetal, recuperação de área degradada.

ABSTRACT

HOFFMANN, Ricardo Bezerra, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, March 2012. **Regeneration of vegetation and soil quality in response to biosolids application to a degraded area.** Advisor: Raphael Bragança Alves Fernandes. Coadvisors: Maurício Paulo Ferreira Fontes; Nerilson Terra Santos and Eduardo de Sá Mendonça.

Since the last century, the world-wide vigorous population growth associated with a increase of urbanization have led to an increase in waste production, especially of biosolids from sewage-treatment plants. The objective of this study was to evaluate the use of biosolids to recovery soils from degraded areas. In the study area, biosolids were applied to 20 plots at five rates (0, 50, 100, 200, and 400 t ha⁻¹), in four replications. After 30, 90, 180, 270, and 360 days, the soil bulk density (BD), particle density (PD), micro (Mi) and macroporosity (Ma) and total porosity (TP), mean weight diameter (MWD) and mean geometric diameter (MGD) of aggregates, water-dispersible clay (WDC), hydraulic conductivity (HC), organic carbon content (OC), and vegetation regeneration were evaluated. The data were subjected to analysis of variance, followed by regression analysis, at 10% probability. In the period of one year, the biosolids rates did not affect the values of TP, Mi, Ma, MWD, MGD and WDC, but increase OC contents and change values of BD, PD and HC. Fifty days after biosolids incorporation into the soil, vigorous growth of the plant cover was recorded. The application of biosolids had little effect on the soil physical properties, because of the short evaluation period. However, the effect on carbon content and the regeneration of degraded vegetation cover was considerable, despite in short period, allowing the conclusion that biosolids application improve soil quality of the degraded area.

Key words: soil physic, vegetation cover, land reclamation

1. Introdução

Mais recentemente, a concentração humana nos centros urbanos tem se constituído como o grande desafio para os órgãos responsáveis pelo saneamento urbano, em especial pela expressiva produção de resíduos que passaram a ser gerados. Uma vez produzidos os resíduos, a legislação brasileira exige dessas empresas de saneamento sua devida destinação final, de forma a não comprometer a qualidade ambiental. Neste cenário, torna-se relevante a busca de formas e alternativas adequadas para o tratamento e, ou, a disposição desses materiais no meio.

Dentre os resíduos mais problemáticos produzidos no meio urbano, o biossólido merece destaque por seu potencial poluidor e devido o crescente e considerável volume produzido diariamente. No Brasil, no início deste século a produção de biossólido foi estimada em pouco mais de 150.000 toneladas anuais (MACHADO, 2001). No entanto, dados mais recentes (EMBRAPA, 2007) dão conta de que somente no Distrito Federal sejam produzidas 400 toneladas de lodo de esgoto por dia.

O aumento na produção de biossólido e as limitações de seu uso pela legislação ambiental geram a necessidade de se encontrar formas alternativas para sua disposição final, sendo a aplicação em áreas não agrícolas uma delas. Neste contexto, os biossólidos podem apresentar-se como importantes insumos na recuperação de áreas degradadas, principalmente, por seu elevado teor de matéria orgânica e, conseqüentemente, sua significativa contribuição na melhoria de várias características físicas, químicas e biológicas dos solos, bem como na melhoria das condições para a regeneração da cobertura vegetal.

Estimativas de quase duas décadas atrás (OLDEMAN, 1994) já apontavam que 15 % dos solos mundiais estavam degradados ou em processo de degradação. No Brasil, dados recentes (BAI et al., 2008) apontam que cerca de 22 % dos solos estejam degradados, afetando cerca de 27 % da população nacional. Destes expressivos dados e cenários de degradação desponta a necessidade de investimentos na recuperação dessas áreas, sendo o bioestabilizado uma das alternativas como potencial contribuinte deste processo de reabilitação de solos.

A aplicação do lodo de esgoto em solos degradados favorece o estabelecimento e crescimento da vegetação. Em estudo com gramíneas e leguminosas, SOPPER (1993) verificou efeitos positivos da aplicação sobre o vigor, porcentagem de cobertura, produtividade e desenvolvimento do sistema radicular. Os benefícios advindos da aplicação do bioestabilizado podem ser associados ao aporte de material orgânico, que promovem a melhoria do estado de agregação das partículas do solo, diminui a densidade e aumenta a aeração dos solos (AGGELIDES e LONDRA, 2000; TSUTIYA, 2001). Os benefícios advindos do uso desses materiais orgânicos alcançam também melhorias nas características químicas e biológicas dos solos (ALVES et al., 2007). Todos esses benefícios da aplicação do resíduo são componentes importantes para o sucesso de práticas de recuperação de áreas degradadas

Neste sentido, estudos que visem analisar os efeitos da adição de bioestabilizado sobre a regeneração da cobertura vegetal e a recuperação física e química de solos degradados são valiosos para subsidiar os gestores públicos quando da eventual revisão das normas ambientais que tratam da disposição destes resíduos, as quais atualmente no Brasil, são muito restritivas ao uso deste resíduo.

Diante do exposto, o objetivo do presente estudo foi avaliar os efeitos sobre as características físicas do solo e sobre a regeneração da cobertura vegetal de uma área degradada após a aplicação de doses crescentes de biossólidos.

2. Material e Métodos

O experimento foi conduzido no interior da Estação de Tratamento de Esgoto Recanto das Emas, pertencente à Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB), localizada na Região Administrativa do Recanto das Emas, no Distrito Federal. A temperatura média anual da região é de 21 °C e a altitude média é de 1.100 metros. O clima é classificado como Aw (tropical de savana), segundo a classificação de Köppen, e apresenta duas estações bem definidas, uma fria e seca (entre maio e setembro) e outra quente e úmida (entre outubro e abril).

O experimento foi instalado em setembro de 2009 e conduzido por um ano em um Latossolo Vermelho Amarelo de área degradada (cascalheira), textura argilosa, cujas principais características químicas e físicas são apresentadas na Tabela 1. Para receber os tratamentos, o solo foi previamente nivelado e preparado com duas gradagens superficiais, sendo na sequência efetuado o piqueteamento das unidades experimentais (UEs), que contavam com dimensões de 5 x 4 m, totalizando 20 m² em cada uma das 20 UEs. Os tratamentos constaram da aplicação de cinco doses de biossólido, equivalentes a 0, 50, 100, 200 e 400 t ha⁻¹ (base seca). O biossólido utilizado nesse trabalho é subproduto do lodo gerado no tratamento de esgoto sanitário por meio de um reator anaeróbico de fluxo ascendente. A caracterização do biossólido utilizado no experimento está apresentada na Tabela 2.

O biossólido foi incorporado ao solo manualmente a uma profundidade média estimada de 10 cm, com auxílio de pás e enxadas. As avaliações nas UEs foram

efetuadas de outubro de 2009 a setembro de 2010, correspondendo aos seguintes períodos de amostragem: 30, 90, 180, 270 e 360 dias, após a incorporação do biossólido. As variáveis foram avaliadas com parcelas subdivididas no tempo, com quatro repetições, utilizando-se o delineamento experimental de blocos casualizados.

Tabela 1. Principais características químicas e físicas do solo da área degradada em estudo

Características	Unidade	Profundidade	
		0 – 20 cm	20 – 40 cm
Matéria Orgânica	dag kg ⁻¹	1,16	0,52
pH(H ₂ O)		5,41	5,29
P-Mehlich-1	mg dm ⁻³	0,70	0,40
K	mg dm ⁻³	19,00	17,00
Na	mg dm ⁻³	20,60	2,80
Ca ²⁺	cmol _c dm ⁻³	0,86	0,66
Mg ²⁺	cmol _c dm ⁻³	0,12	0,10
Al ³⁺	cmol _c dm ⁻³	0,00	0,00
(H+Al)	cmol _c dm ⁻³	2,30	0,80
SB	cmol _c dm ⁻³	1,12	0,81
V	%	32,70	50,30
Argila	dag kg ⁻¹	49	47
Silte	dag kg ⁻¹	14	16
Areia fina	dag kg ⁻¹	16	14
Areia grossa	dag kg ⁻¹	21	23
Densidade de partículas	kg dm ⁻³	2,70	2,70
Densidade do solo	kg dm ⁻³	1,12	1,09

Para a avaliação da recuperação da qualidade do solo referente às suas características físicas, foram avaliadas a densidade do solo (Ds) e de partículas (Dp), microporosidade (Mi), macroporosidade (Ma) e porosidade total (Pt) do solo, argila dispersa em água (ADA), condutividade hidráulica (CH) em meio saturado e a estabilidade de agregados, além do teor de carbono total (C) no solo. As

metodologias utilizadas nas análises foram as descritas em EMBRAPA (1997). Para a avaliação da estabilidade de agregados, foram calculados os índices de Diâmetro Médio Geométrico (DMG) e o Diâmetro Médio Ponderado (DMP). As análises de carbono seguiram a metodologia de Yeomans & Bremner (1988).

Tabela 2. Características químicas e físicas do bio sólido utilizado no experimento e seus valores máximos* permitidos no lodo de esgoto ou produto derivado

Característica	Unidade	Bio sólido	CONAMA*
pH		8,93	-
Sólidos totais	%	15,39	-
C	%	36,48	-
N	%	1,22	-
P(P ₂ O ₅)	%	0,47	-
K	%	0,29	-
Ca	%	1,12	-
Mg	%	0,31	-
Al	%	2,65	-
Na	mg kg ⁻¹	554,98	-
Cu	mg kg ⁻¹	183,80	1.500
Zn	mg kg ⁻¹	647,86	2.800
Mn	mg kg ⁻¹	128,43	-
Fe	mg kg ⁻¹	26.845,87	-
Cd	mg kg ⁻¹	5,77	39
Ni	mg kg ⁻¹	14,43	420
Pb	mg kg ⁻¹	46,34	300
Cr	mg kg ⁻¹	45,25	1.000

* Com base na Resolução CONAMA n.375/2006

Para as análises físicas foram tomadas amostras indeformadas e deformadas, segundo os procedimentos de cada determinação. As amostras deformadas foram coletadas com um trado do tipo holandês, na profundidade de 0 a 20 cm. As amostras indeformadas, uma por parcela, foram retiradas com auxílio de anéis metálicos (6 cm

de altura e 5 cm de diâmetro), totalizando quatro amostras por tratamento. No caso da condutividade hidráulica, três amostras de anéis foram retiradas por parcela, totalizando 12 amostras por tratamento. Uma vez coletadas, as amostras foram encaminhadas ao Laboratório de Física do Solo, do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, onde as análises foram processadas.

A regeneração da cobertura vegetal foi avaliada segundo o método da corda graduada (HARTWIG e LAFLEN, 1978). O procedimento consiste da utilização de uma corda de 6,40 m de comprimento, marcada com tinta a cada 20 cm. A corda é estendida nas duas diagonais de cada parcela. A porcentagem de cobertura vegetal é estimada pela razão entre o número de vezes em que os pontos marcados na corda coincidem com algum tipo de cobertura vegetal e o total de pontos disponíveis.

Todos os dados obtidos foram submetidos à análise de variância, seguida de análise de regressão, buscando avaliar o efeito das doses, tempo e interação dose e tempo sobre as variáveis em estudo. O programa estatístico utilizado foi o SAEG 9.1 (UFV, 2007).

3. Resultados e Discussão

Alterações nas características físicas são frequentemente verificadas quando da aplicação de materiais orgânicos ao solo, dentre eles o biossólido. Essas alterações são diretamente relacionadas à quantidade de biossólido aplicada (MELO et al., 2004), entretanto, neste estudo não se verificou efeito das doses aplicadas, ao longo dos tempos de coletas, para os índices Pt, Mi, Ma, DMP, DMG e ADA. As demais variáveis físicas foram influenciadas pelas doses e tempos de coleta avaliados.

Discreta redução nos valores de densidade do solo (Ds) foi verificada apenas nas duas primeiras coletas e, nos tempos de coleta subsequentes não se verificou

efeito das doses aplicadas (Figura 1). A redução dos valores de Ds nos primeiros meses da aplicação do biossólido pode ser associada ao efeito do material orgânico adicionado sobre a agregação do solo, com impactos positivos sobre sua porosidade, como também verificado em outros estudos (SOUZA et al., 2005; MARIA et al., 2007; CAMPOS e ALVES, 2008; TRANNIN et al. 2008). Este efeito foi diluído com o passar do tempo, possivelmente pela mineralização da matéria orgânica, o que levou os valores de Ds a níveis similares aos verificados naturalmente no solo, ainda que em doses elevadas.

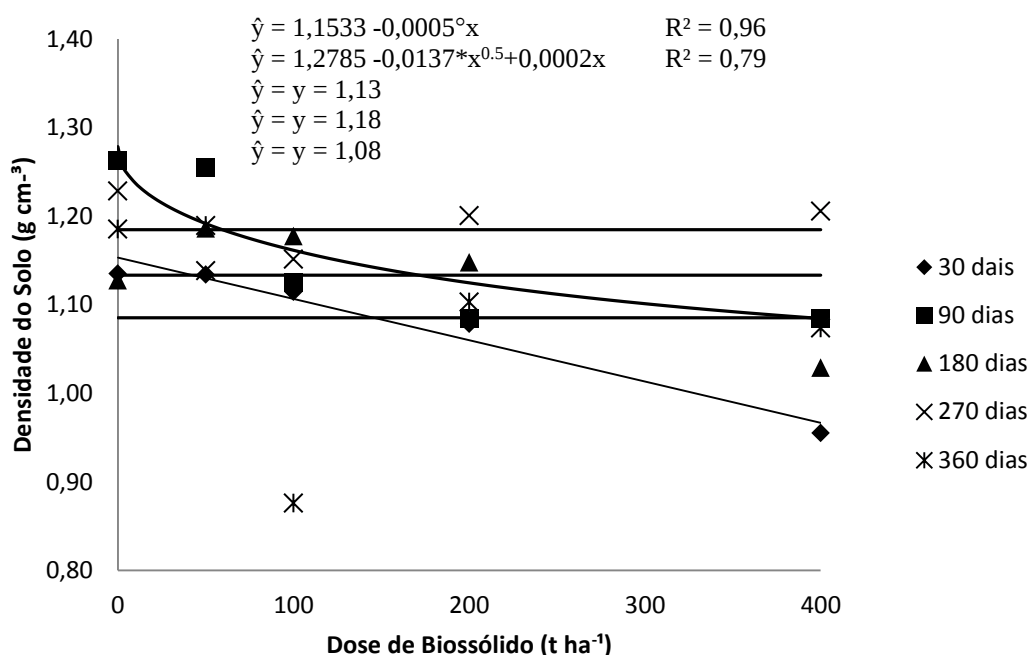


Figura 1. Densidade de solo da área degradada após aplicação de biossólido.

À exceção da quarta avaliação (270 dias), nos demais momentos de coleta, foi verificado efeito da aplicação do biossólido sobre os valores de densidade de partículas (Dp) (Figura 2). Embora não muito comum tal observação, a redução de valores desta variável costuma ser associada à contribuição de altas taxas de material

orgânico aplicadas no solo, como já sugerido por FERREIRA e DIAS JÚNIOR (2001).

A porosidade total do solo, bem como a microporosidade e a macroporosidade não foram influenciadas pela incorporação das doses de biossólido, nos diferentes tempos de coleta avaliados (Figuras 3, 4 e 5). FURRER e STAUFFER (1983) afirmam que a adição do biossólido pode não alterar a porosidade total, o que foi verificado por MELO et al. (2004), após a aplicação do material até a dose de 50 t ha⁻¹ por cinco anos, em um Latossolo Vermelho. Por outro lado, outros autores detectaram efeito da aplicação de materiais orgânicos sobre essa propriedade do solo (LUE-HING et al., 1992 e CAMPOS e ALVES, 2008). JORGE et al. (1991) e SORT & ALCANIZ (1999) também não verificaram diferenças na microporosidade com a aplicação anual no solo, e durante quatro anos, de 20 e 400 t ha⁻¹ de lodo de esgoto, respectivamente. A ausência de efeito sobre a macroporosidade, ainda que não esperada por ser essa uma variável mais sensível ao manejo do solo, encontra consonância em outros trabalhos da literatura (CAMILOTTI et al., 2006; COLODRO, 2006 e KITAMURA et al., 2008).

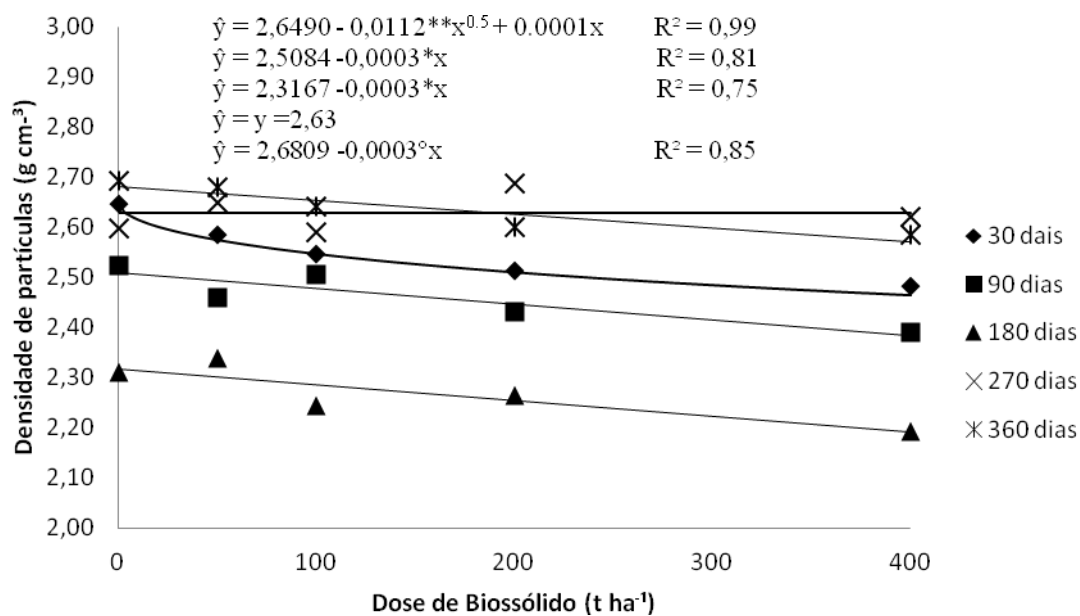


Figura 2. Densidade de partículas de área degradada após aplicação de biofósforo.

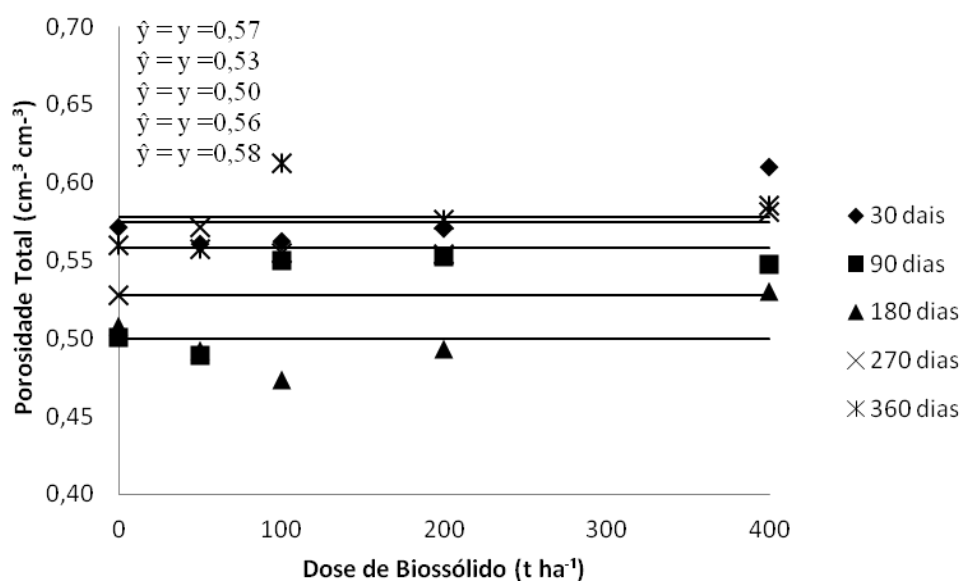


Figura 3. Porosidade total do solo de área degradada após aplicação de biofósforo.

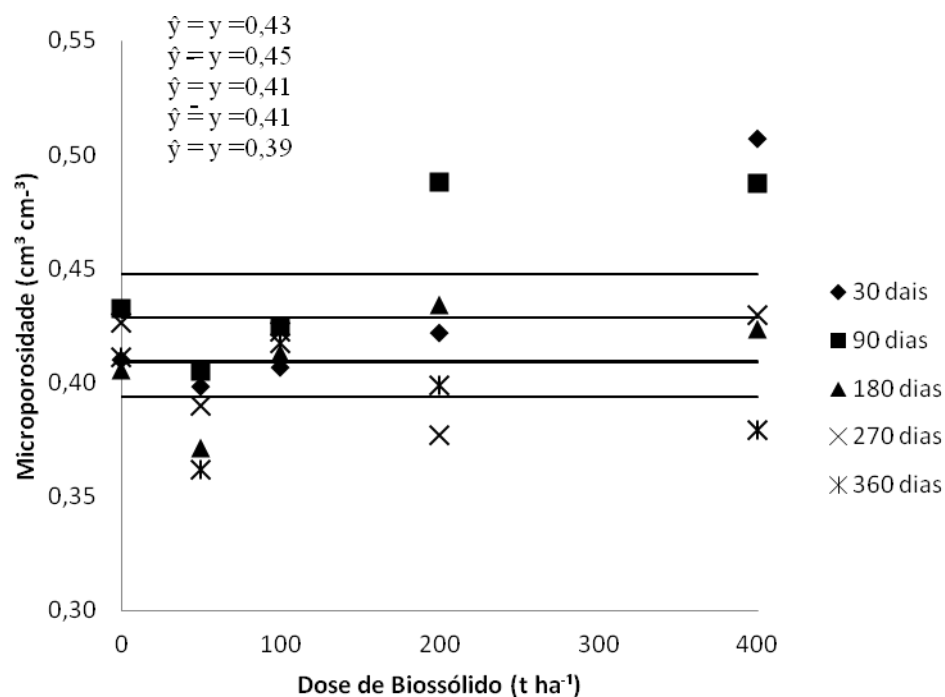


Figura 4. Microporosidade do solo de área degradada após aplicação de biossólido.

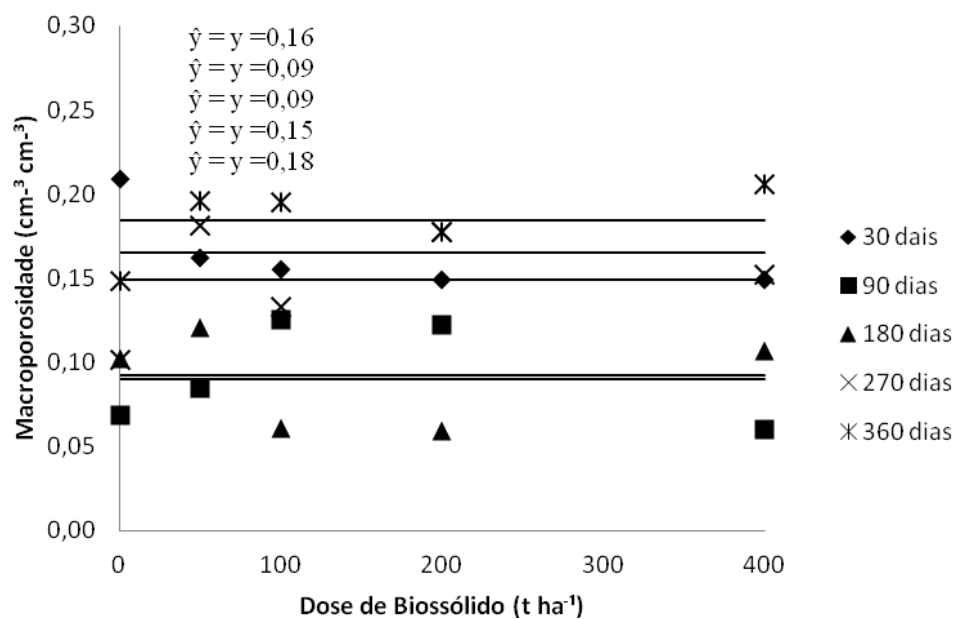


Figura 5. Macroporosidade do solo de área degradada após aplicação de biossólido.

Os índices de agregação DMP (Figura 6) e DMG (Figura 7) também não responderam à aplicação das doses de biossólido, nos distintos tempos avaliados. Como na determinação desses índices são utilizadas amostras de agregados de maior

tamanho (2 - 4 mm), pode ser que os efeitos do biossólido ainda não tenham permitido ganhos nesta classe de tamanho ou que eventuais agregados maiores formados, após a disposição do material orgânico, não tenham ainda estabilidade suficiente para suportar o ensaio que foi efetuado por via úmida.

Como esperado, o aporte de material orgânico, via aplicação de biossólidos provocou o aumento dos teores de carbono orgânico do solo (Figura 8). Tal condição para fins de recuperação de áreas degradadas é importante, pois a matéria orgânica é um componente fundamental para a qualidade do solo, com impactos positivos nas suas características físicas, químicas e biológicas, bem como para criar condições mais apropriadas para o estabelecimento da vegetação.

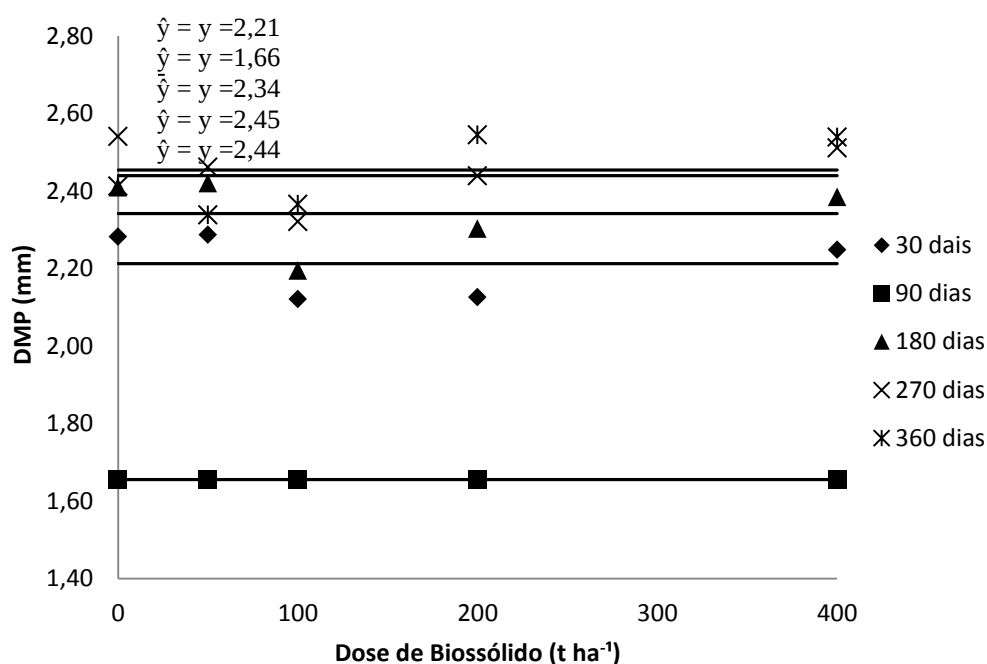


Figura 6. Diâmetro Médio Ponderado (DMP) do solo de área degradada após aplicação de biossólido.

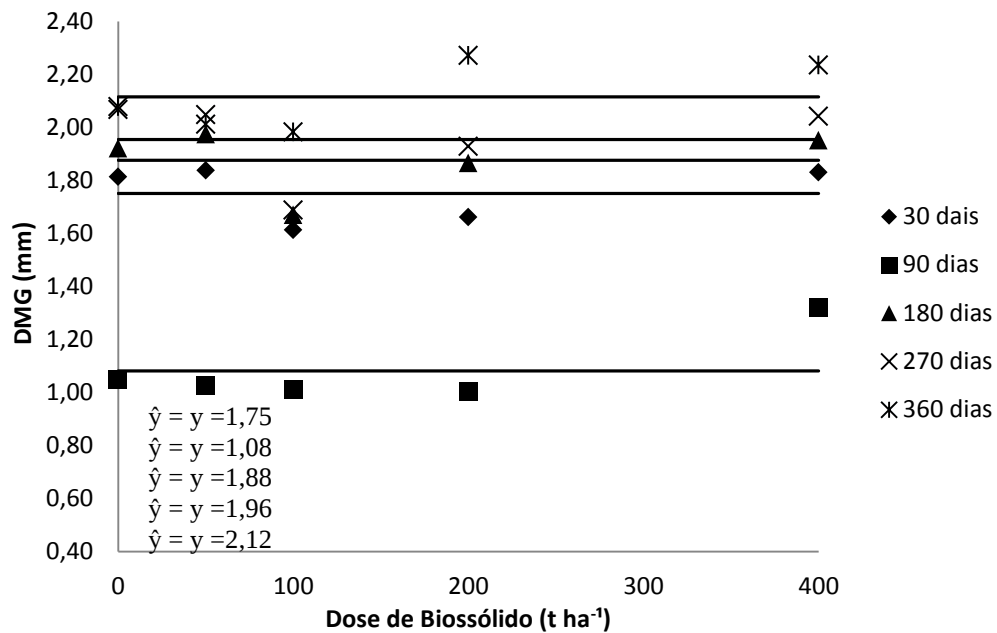


Figura 7. Diâmetro Médio Geométrico (DMG) do solo de área degradada após aplicação de biofósforo.

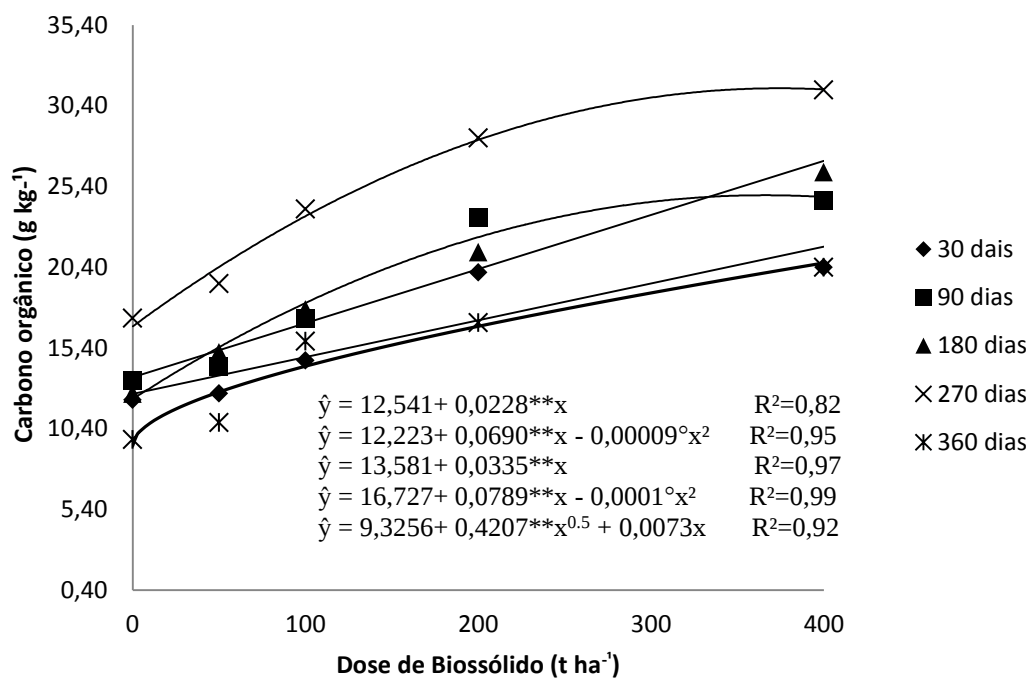


Figura 8. Carbono orgânico de solo de área degradada após aplicação de biofósforo.

Em muitos trabalhos os biofósforos são apresentados como condicionadores, tendo em vista seu potencial de garantir o aumento e a manutenção do teor de carbono nos solos (AYUSO et al., 1992; DÍAZ-BURGOS e POLO, 1991; BERNAL

et al., 1998a e ALBIACH et al., 2001). GERZABEK et al. (2001) destacam ainda que a matéria orgânica presente nos biossólidos está sujeita à intensiva digestão aeróbia e anaeróbia nas estações de tratamento, podendo ser considerada relativamente recalcitrante, o que permite rapidamente promover incrementos no teor de carbono no solo. Este efeito crescente da adição do resíduo orgânico sobre os teores de C do solo foi consistente e verificado em todas as coletas efetuadas.

Alterações na dinâmica dos fenômenos de dispersão e floculação são esperadas quando se aplica elevadas doses de materiais orgânicos no solo, sendo um importante indicador destas variações a argila dispersa em água (ADA). Entretanto, o incremento das doses incorporadas de biossólido não afetaram os valores desta variável (Figura 9). Ainda que, em termos médios, o teor de ADA tenha sido mais que duplicado ao final de um ano, em relação ao primeiro mês de coleta, os valores atingidos não denotam grande incremento de ordem prática. Obviamente que o monitoramento deve ser continuado, buscando acompanhar a tendência de variação desta variável no solo, pois a aplicação de grandes doses de materiais orgânicos pode proporcionar um desbalanceamento no sistema de cargas, incrementando ainda mais as cargas negativas do solo, acarretando favorecimento da dispersão e, por conseguinte, de seus efeitos sobre a qualidade do solo.

A aplicação do biossólido alterou os valores de condutividade hidráulica em meio saturado do solo, da área degradada (Figura 10). A expectativa com a adição do resíduo orgânico é que seu efeito na estrutura do solo pudesse contribuir com a melhoria nas condições de movimentação da água do solo, o que apresentaria impactos positivos diretos e indiretos sobre a regeneração vegetal, em áreas degradadas. Entretanto, em apenas três épocas de avaliação as diferenças foram constatadas, sem que algum padrão nos resultados pudesse ser identificado.

A incorporação do biossólido impactou positivamente e diretamente a regeneração da cobertura vegetal da área degradada (Figura 11), à exceção da avaliação efetuada aos 30 dias. Nas épocas de análise subsequente, o efeito positivo do biossólido já se mostrou efetivo logo com a aplicação da menor dose de biossólido, seguido por incrementos menores, mas crescentes, com o aumento da dose aplicada. A ausência de efeito no primeiro mês de avaliação pode ser atribuída à quantidade incorporada de biossólido, que ocasionou a formação de uma espessa camada de material orgânico, impedindo naquele momento de avaliação o processo de germinação da vegetação natural.

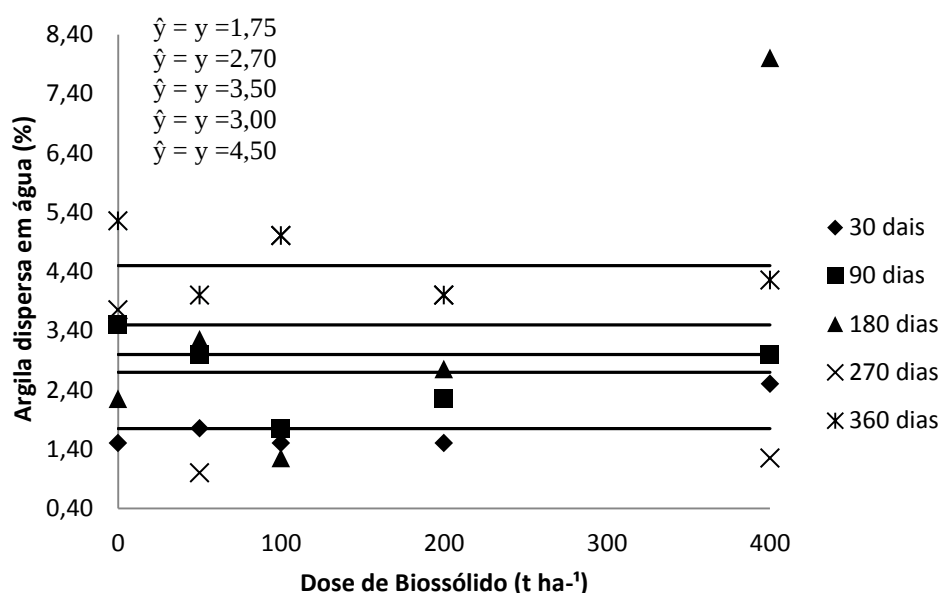


Figura 9. Argila dispersa em água de solo de área degradada após aplicação de biossólido.

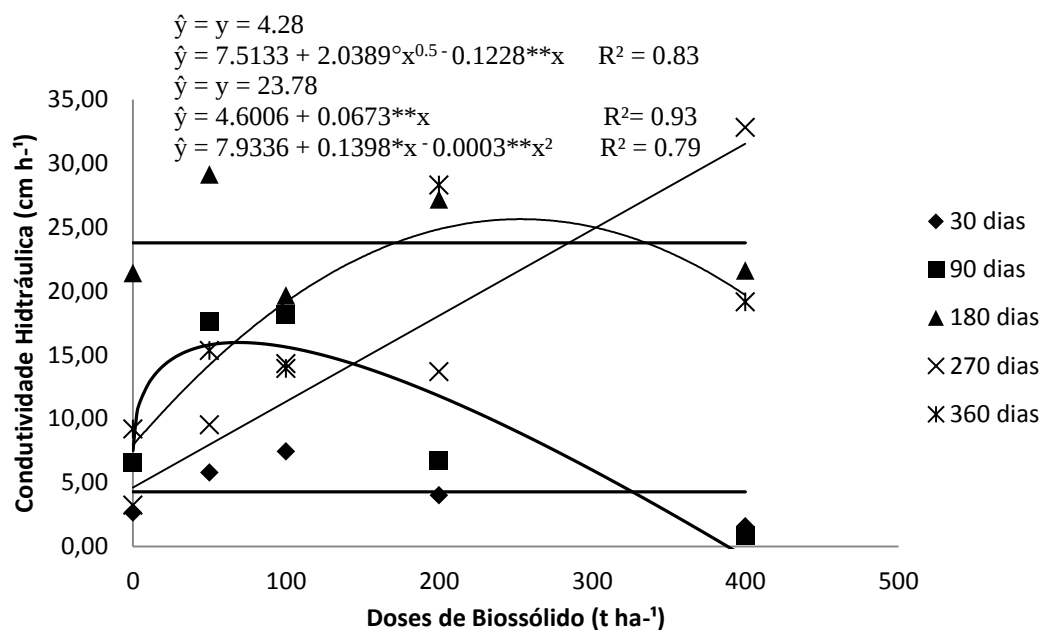


Figura 10. Condutividade hidráulica em meio saturado do solo da área degradada após aplicação de biossólido.

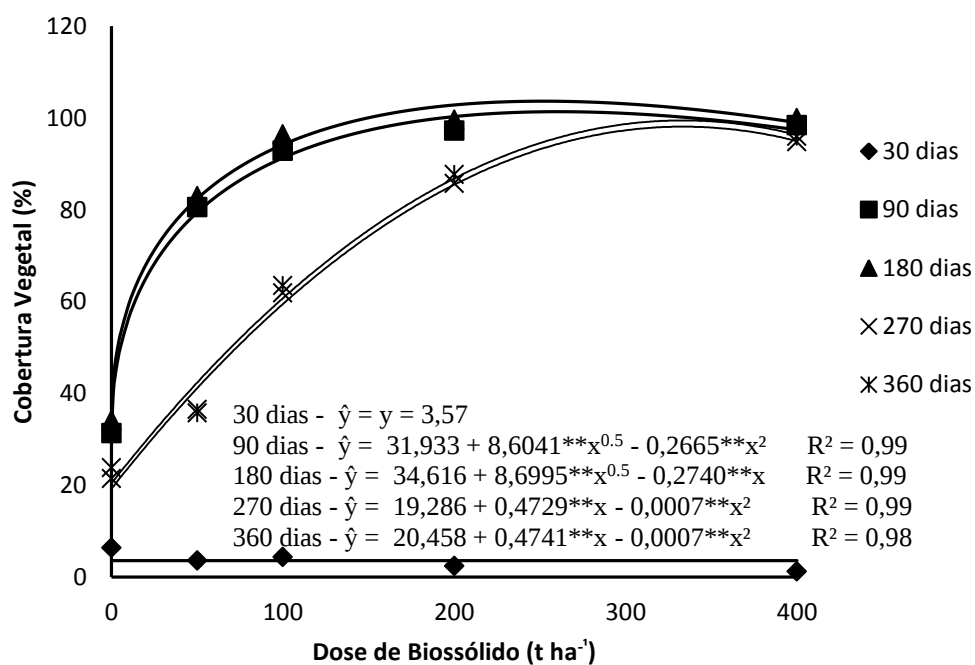


Figura 11. Cobertura vegetal em solo de área degradada após aplicação de biossólido.

Embora as curvas ajustadas das equações sugiram, para a segunda e terceira coletas, um decréscimo na cobertura entre as duas últimas doses aplicadas, a observação dos pontos sugere o alcance de um patamar logo a partir da dose de 100 t ha⁻¹. A redução da cobertura na avaliação da quarta e quinta coleta nas doses intermediárias, em relação à segunda e terceira, é associada à chegada da estação seca, que reduz um pouco a intensidade da folhagem, muito embora tal efeito não tenha sido verificado na maior dose aplicada. Diante do observado, considera-se que, além das características discutidas previamente, o incremento da matéria orgânica do solo, das condições de fertilidade e mesmo da manutenção da umidade proporcionada pela aplicação do biossólido favoreceram o desenvolvimento vegetal na área degradada.

O expressivo incremento da cobertura vegetal nas doses de biossólido em relação ao tratamento controle, como também verificado por GODOI et al. (2008), é bastante interessante para fins de recuperação de áreas degradadas, constituindo uma meta desejável e buscada em diferentes técnicas de remediação e recomposição. A garantia do estabelecimento da vegetação em áreas degradadas é o primeiro passo para se conseguir sua estabilização e para servir de base para que a área seja efetivamente recuperada, onde se inicia um processo de recomposição da vegetação, em que os ganhos posteriores e sucessivos de biodiversidade florística, em número e diversidade de espécies, podem garantir o sucesso da recuperação da área.

Tendo em vista os riscos associados à sua disposição no solo, e independente do potencial positivo verificado para fins de recuperação de áreas degradadas, a utilização de biossólidos deve ser efetuada com os devidos cuidados na distribuição, incorporação, controle de acesso à área, e seguidos de um programa de monitoramento que acompanhe possíveis outros efeitos sobre o meio ambiente.

4. Conclusões

1 - A aplicação de biossólido não influenciou as características físicas do solo, mas afetou positivamente, em termos de ganhos, nos teores de carbono orgânico e nos incrementos da taxa de regeneração e desenvolvimento da vegetação no solo da área degradada.

2 - Tendo em vistas as restrições ambientais para seu uso agrícola, que tendem a ser mantidas, a utilização de biossólido em projetos de recuperação de áreas degradadas apresenta-se como uma alternativa para a disposição final deste subproduto do lodo de esgoto.

5. Bibliografia

AGGELIDES, S. M.; LONDRA, P. A. Effects of compost produced from town wastes and sewage sludge on the physical properties of a loamy and clay soil. *Bioresource Technology*, v.71, p.253-259, 2000.

ALBIACH, R.; CONET, R.; POMARES, F.; INGELMO, F. Decomposition of different organic materials in soils. *Biology and Fertility of soils*, v.18, p.175-182, 1994.

ALVES, M. C.; SUZUKI, L. G. A. & SUZUKI, L. E. A. S. Densidade do solo e infiltração de água como indicadores da qualidade física de um Latossolo Vermelho distrófico em recuperação. *R. Bras. Ci. Solo*, v.31, p.617-625, 2007.

AYUSO, M.; HERNANDEZ, T.; GARCIA, C.; COSTA, F. Utilización d'un lodo aerobio como substitutivo de fertilizantes fosforados inorgánicos. *Suelo y Planta*, v.2, p.271-280, 1992.

BAI Z. G.; DENT D. L.; OLSSON L. & SCHAEPMAN M. E. Global assessment of land degradation and improvement. 1. Identification by remote sensing. Report 2008/01, ISRIC – World Soil Information, Wageningen. 2008. 78p.

BERNAL, M. P.; SÁNCHEZ-MONEDERO, M. A.; PAREDES, C.; ROIG, A. carbon mineralization from organic wastes at different composting stages during their incubation with soil. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v.69, p.175-189, 1998.

CAMILOTTI, F.; ANDREOLI, I. & MARQUES, M. O. Atributos físicos de um Latossolo cultivado com cana-de-açúcar após aplicações de lodo de esgoto e vinhaça. *Eng. Agríc.*, v.3, p.738-747, 2006.

CAMPOS, F. S. & ALVES, M. C. Uso de lodo de esgoto na reestruturação de solo degradado. *R. Bras. Ci. Solo*, v.32, p.1389-1397, 2008.

COLODRO, G. Recuperação de solo de área de empréstimo com lodo de esgoto. Campinas, Universidade Estadual de Campinas, 2006. 82p. (Tese de Doutorado).

DÍAZ-BURGOS, M. A.; POLO, A. Variaciones de La fracción orgánica durante el compostaje de lodos depuradoras. Suelo y Planta, v.1, p.453-466, 1991.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Lodo de esgoto vira fertilizante nas culturas de soja e milho. Disponível em <http://www.embrapa.br/embrapa/imprensa/noticias/2007/marco/foldernoticia.2007-03-26.6950368216/noticia.2007-03-27.5882511657>. Acesso em 22 out. 2011.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Manual de métodos de análise de solo. 2.ed. Rio de Janeiro, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212p.

FERREIRA, M. M. & DIAS JÚNIOR, M. S. Física do solo. Lavras: UFLA/FAEPE, 2001. 117p.

FURRER, O.J.; STAUFFER, W. Influence of sewage sludge application on physical properties of soils and its contribution to the humus balance. In: THE INFLUENCE of sewage sludge application on physical and biological properties of soils. Dordrecht: D. Reidel, 1983. p.65-74.

GERZABEK, M.H.; HABERHAUER, G. & KIRCHMANN, H. Soil organic matter pools and carbon-13 natural abundances in particle-size fractions of a long-term agricultural field experiment receiving organic amendments. Soil Sci. Soc. Am. J., v.65, p.352-358, 2001.

GODOI, E. L.; BORGES, J. D. & LEANDRO, W. M. Índices de cobertura vegetal de *Stylosanthes guanensis* Cv. Mineirão em área degradada, fertilizada com adubo mineral e biossólido. Pesquisa Agropecuária Tropical, v.38, p.21-26, 2008.

HARTWIG, R. O. & LAFLÉN, J. M. A meters tick method for measuring crop residue cover. J. Soil Water. Conserv., v.33, p.90-91, 1978.

JORGE, J.A.; CAMARGO, O.A.; VALADARES, J.M.A.S. Condições físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro quatro anos após aplicação de lodo de esgoto e calcário. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.15, p.237-240, 1991.

KITAMURA, A. E.; ALVES, M. C.; GUSTAVO, L. & GONZALEZ, A. S. Recuperação de um solo degradado com aplicação de adubos verdes e lodo de esgoto. R. Bras. Ci. Solo, v.32, p.405-416, 2008.

LUE-HING, C.; ZENZ, D. R.; KUCHENRITHER. Municipal sewage sludge management: processing, tilization and disporal. Water Qual. Manage., v.4, p.455-500. 1992.

MACHADO, M. F. S. A situação brasileira dos biossólidos. Faculdade de Engenharia Civil, Universidade de Campinas, Campinas, 2001. 828p. (Dissertação de Mestrado).

MARIA, I. C.; KOCSSI, M. A. & DECHEN, S. C. Agregação do solo em área que recebeu lodo de esgoto. Bragantia, v.66, p.291-298, 2007.

MELO, V. P.; BEUTLER, A. N.; SOUZA, Z. M.; CENTURION, J. F. & MELO, W. J. Atributos físicos de Latossolos adubados durante cinco anos com biossólido. Pesq. Agropec. Bras., v.39, p.67-72, 2004.

OLDEMAN, L. R. The global extent of soil degradation. In: GREENLAND, D. J. & SZABOCLS, I., eds. Soil resilience and sustainable land use. Wallingford, Cab International, p.99-118. 1994.

SORT, X.; ALCANIZ, J.M. Modification of soil porosity after application of sewage sludge. Soil & Tillage Research, v.49, p.337-345, 1999.

SOUZA, Z. M.; BEUTLER, A. N.; MELO, V.P. & MELO, W. J. Estabilidade de agregados e resistência à penetração em Latossolos adubados por cinco anos com biossólidos. R. Bras. Ci. Solo, v.29, p.117-123, 2005.

TRANNIN I. C. B., SIQUEIRA J. O.; MOREIRA F. M. S. Atributos químicos e físicos de um solo tratado com biossólido industrial e cultivado com milho. Eng. Agríc., v.12, p.223-230, 2008.

TSUTIYA, M. T. Alternativas de disposição final de biossólido. In: TSUTIYA, M. T.; COMPARINI, J. B.; SOBRINHO, P. A.; HESPANHOL, I.; CARVALHO, P. C. T.; MELFI, A. J.; MELO, W. J. & MARQUES, M. O. (Eds.). Biossólidos na agricultura. São Paulo, SABESP, Escola Politécnica – USP, ESALQ, UNESP, p.133-180. 2001.

UFV - UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA - SAEG - Sistema para Análises Estatísticas. Versão 9.1. Fundação Arthur Bernardes. Viçosa: UFRV, 2007. Disponível em: <http://www.ufv.br/saeg/> Acesso em 22 jun. 2011.

YEOMANS, J.C. & BREMNER, J.M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. Comm. Soil Sci. Plant Anal., v.19, p.1467-1476, 1988.

CAPÍTULO 2

DINÂMICA DA MATÉRIA ORGÂNICA EM SOLO DE ÁREA DEGRADADA APÓS APLICAÇÃO DE BIOSSÓLIDO

RESUMO

HOFFMANN, Ricardo Bezerra, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2012. **Dinâmica da matéria orgânica em solo de área degradada após aplicação de biossólido.** Orientador: Raphael Bragança Alves Fernandes. Co-orientadores: Maurício Paulo Ferreira Fontes, Nerilson Terra Santos e Eduardo de Sá Mendonça.

Os biossólidos são produtos orgânicos originados a partir do sistema de tratamento de esgotos, e que possuem na sua constituição expressiva quantidade de matéria orgânica e nutrientes, o que os qualifica como insumos alternativos para uso em recuperação de áreas com solos degradados. Neste contexto, o objetivo desse trabalho foi avaliar alterações na dinâmica da matéria orgânica de um solo de área degradada após a aplicação de biossólido. Na área de estudo, foram montadas 20 parcelas, que receberam aplicação de cinco doses (0, 50, 100, 200 e 400 t ha⁻¹) de biossólido, com quatro repetições. Aos 30, 90, 180, 270 e 360 dias foram avaliados, em condições de campo, variáveis associadas à matéria orgânica como indicadoras da possível recuperação da qualidade do solo: teores de C e N total; nitrato; amônio; teores de C e N da biomassa microbiana; quantidade e teores de C e N da matéria orgânica leve; e teores de C e N das substâncias húmicas. Os resultados obtidos indicaram que o C e N totais da biomassa microbiana e da matéria orgânica leve no solo responderam ao incremento das doses de biossólido; o nitrato e amônio tiveram seus teores reduzidos com o passar do tempo e, a humina foi a fração que mais acumulou carbono e nitrogênio. De uma forma geral, a aplicação de biossólido no solo promove ganhos no estoque de C e N armazenado nas formas totais, na biomassa microbiana, na matéria orgânica leve e nas substâncias húmicas, consequências muito interessantes e desejadas quando se trabalha com a recuperação de solos de áreas degradadas.

Palavras-chave: carbono orgânico, recuperação de áreas degradadas, lodo de esgoto.

ABSTRACT

HOFFMANN, Ricardo Bezerra, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, March 2012. **Dynamics of organic matter in degraded soil after biosolids application.** Advisor: Raphael Bragança Alves Fernandes. Coadvisors: Maurício Paulo Ferreira Fontes, Nerilson terra Santos and Eduardo de Sá Mendonça.

Biosolids are organic products from sewage-treatment systems, which contain a significant amount of organic matter and nutrients, and these characteristics can indicate these materials as alternative inputs for degraded soil reclamation. In this context, the objective of this study was to evaluate changes in organic matter dynamics of soil from degraded areas after biosolids application. In the study area, 20 plots were treated with five biosolids rates (0, 50, 100, 200, and 400 t ha⁻¹), with four replications. After 30, 90, 180, 270, and 360 days, organic-matter attributes (total C and N; nitrate; ammonium; and C and N contents from microbial biomass, light organic matter; and humic substances) were studied as indicators to evaluate soil quality recovery under field conditions. Results indicated that total C and N from microbial biomass and light organic matter in soil increase positively with increasing biosolid rates; ammonium and nitrate contents decreased during study period; and humin fraction accumulated most C and N at the end of experiment. In general, soil biosolids applications resulted in increases in the C and N pools stored in the total microbial biomass, organic matter and light humic substances, which are very interesting and desirable effects to soil recovery from degraded areas.

Key words: organic carbon, land reclamation, sewage sludge.

1. Introdução

Os biossólidos são produtos orgânicos originados a partir do sistema de tratamento de esgotos, e que possuem na sua constituição expressiva quantidade de matéria orgânica e nutrientes, o que os qualifica como insumos alternativos para uso em recuperação de áreas com solos degradados. A dinâmica da matéria orgânica no solo pode ser influenciada pela aplicação desse resíduo (MELO et al., 2001), muito embora sua aplicação deva ser criteriosa a fim de se evitar a contaminação do meio ambiente (CARVALHO e BARRAL, 1981; TSUTIYA, 2001).

Segundo Tsutyia (2001), os solos de áreas degradadas caracterizam-se por não fornecer condições adequadas ao desenvolvimento e fixação da vegetação em função da falta de matéria orgânica, de nutrientes no solo e de atividade biológica. Neste sentido, a adição de biossólido pode apresentar grande potencial que favoreça a recuperação dessas áreas. Estimativas de mais de quase duas décadas atrás (OLDEMAN, 1994) já apontavam que 15 % dos solos mundiais estavam degradados ou em processo de degradação. No Brasil, dados recentes (BAI et al., 2008) apontam que cerca de 22 % dos solos estejam degradados, afetando cerca de 27 % da população nacional. Destes expressivos dados e cenários de degradação desponta a necessidade de investimentos na recuperação dessas áreas, sendo o biossólido uma alternativa a mais na contribuição deste processo de reabilitação deste importante recurso natural que é o solo.

De acordo com TAMANINI (2004), a aplicação de biossólido no solo pode causar aumento no teor de matéria orgânica, melhorar o nível de fertilidade, podendo promover o aumento de pH, diminuição da acidez potencial, aumento da disponibilidade e reservatório de nutrientes, como Ca, Mg, S e outros elementos, em decorrência da lenta liberação dos mesmos através do processo de mineralização,

além de apresentar efeitos sobre a capacidade de troca de cátions e na melhoria do poder tampão do solo.

Incrementos de matéria orgânica merecem ser destacados, tendo em vista sua grande importância no solo. Neste sentido, o estudo da dinâmica da matéria orgânica, em especial a partir da quantificação do C e N presente em seus compartimentos, pode fornecer relevantes informações acerca do armazenamento desses elementos no solo, cujos ciclos biogeoquímicos apresentam estreita relação com a qualidade do solo. A aplicação de biossólido apresenta grande potencial de incrementar o estoque de C e N nos solos de áreas degradadas, pois, de forma direta, consiste em mais material orgânico adicionado ao solo e, indiretamente, favorece o maior desenvolvimento de plantas, aumentando, por conseguinte, o aporte de resíduos vegetais ao solo.

Diante do exposto, o objetivo desse trabalho foi avaliar as alterações na dinâmica da matéria orgânica de um solo de área degradada após a aplicação de biossólido, avaliando-se os teores de C e N total presente no solo, na matéria orgânica leve, na biomassa microbiana e nas frações das substâncias húmicas.

2. Material e Métodos

O experimento foi conduzido no interior da Estação de Tratamento de Esgoto Recanto das Emas, pertencente à Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB), localizada na Região Administrativa do Recanto das Emas, no Distrito Federal. A temperatura média anual da região é de 21 °C e a altitude média é de 1.100 metros. O clima é classificado como Aw (Tropical de Savana), segundo a classificação de Köppen, e apresenta duas estações bem definidas, uma fria e seca (entre maio e setembro) e outra quente e úmida (entre outubro e abril).

O experimento foi instalado em setembro de 2009 e conduzido por um ano em um Latossolo Vermelho Amarelo de área degradada (cascalheira), textura argilosa, cujas principais características químicas e físicas são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Principais características químicas e físicas do solo da área degradada em estudo.

Características	Unidade	Profundidade	
		0 – 20 cm	20 – 40 cm
Matéria Orgânica	dag kg ⁻¹	1,16	0,52
pH(H ₂ O)		5,41	5,29
P-Mehlich-1	mg dm ⁻³	0,70	0,40
K	mg dm ⁻³	19,00	17,00
Na	mg dm ⁻³	20,60	2,80
Ca ²⁺	cmol _c dm ⁻³	0,86	0,66
Mg ²⁺	cmol _c dm ⁻³	0,12	0,10
Al ³⁺	cmol _c dm ⁻³	0,00	0,00
(H+Al)	cmol _c dm ⁻³	2,30	0,80
SB	cmol _c dm ⁻³	1,12	0,81
V	%	32,70	50,30
Argila	dag kg ⁻¹	49	47
Silte	dag kg ⁻¹	14	16
Areia fina	dag kg ⁻¹	16	14
Areia grossa	dag kg ⁻¹	21	23
Densidade de partículas	kg dm ⁻³	2,70	2,70
Densidade do solo	kg dm ⁻³	1,12	1,09

Para receber os tratamentos, o solo foi previamente nivelado e preparado com duas gradagens superficiais, sendo na sequência efetuado o piqueteamento das unidades experimentais (UEs), com dimensões de 5 x 4 m, totalizando 20 m² cada uma das 20 UEs. Os tratamentos constaram da aplicação de cinco doses de

biossólido, equivalentes a 0, 50, 100, 200 e 400 t ha⁻¹ (base seca). O biossólido utilizado nesse trabalho é um subproduto do lodo gerado no tratamento de esgoto por meio de um reator anaeróbico de fluxo ascendente. A caracterização do biossólido utilizado no experimento está apresentada na Tabela 2.

Tabela 2. Características químicas e física do biossólido utilizado no experimento e valores máximos* permitidos no lodo de esgoto ou produto derivado

Característica	Unidade	Biossólido	CONAMA*
pH		8,93	-
Sólidos totais	%	15,39	-
C	%	36,48	-
N	%	1,22	-
P(P ₂ O ₅)	%	0,47	-
K	%	0,29	-
Ca	%	1,12	-
Mg	%	0,31	-
Al	%	2,65	-
Na	mg kg ⁻¹	554,98	-
Cu	mg kg ⁻¹	183,80	1.500
Zn	mg kg ⁻¹	647,86	2.800
Mn	mg kg ⁻¹	128,43	-
Fe	mg kg ⁻¹	26.845,87	-
Cd	mg kg ⁻¹	5,77	39
Ni	mg kg ⁻¹	14,43	420
Pb	mg kg ⁻¹	46,34	300
Cr	mg kg ⁻¹	45,25	1.000

*Com base na Resolução CONAMA n.375/2006.

O biossólido foi incorporado ao solo manualmente, a uma profundidade média estimada de 10 cm, com auxílio de pás e enxadas. As avaliações nas UEs foram efetuadas durante um ano, de outubro de 2009 a setembro de 2010, nos

seguintes períodos de amostragem: 30, 90, 180, 270 e 360 dias, após a incorporação do biossólido. O delineamento experimental foi o de blocos casualizados, com parcelas subdivididas no tempo.

Para a avaliação da recuperação da qualidade do solo referente às características associadas à matéria orgânica foram avaliados o teor de carbono orgânico (CO), nitrogênio total (NT), nitrato (NO_3^-), amônio (NH_4^+), C da biomassa microbiana (C-Bio), N da biomassa microbiana (N-Bio), quantidade de matéria orgânica leve (MOL), C da matéria orgânica leve (C-MOL), N da matéria orgânica leve (N-MOL), C de ácidos fúlvicos (C-AF), C de ácidos húmicos (C-AH), C da fração humina (C-HUM), N de ácidos fúlvicos (N-AF), N de ácidos húmicos (N-AH), e N da fração humina (N-HUM). As metodologias utilizadas nas análises foram as descritas em MENDONÇA e MATOS (2005).

Para todas as análises foram tomadas amostras deformadas, segundo os procedimentos de cada determinação. As amostras foram coletadas com um trado do tipo holandês, na profundidade de 0 a 20 cm, sendo coletadas três amostras simples por parcela, que formaram uma amostra composta por parcela, totalizando-se quatro amostras por tratamento. Uma vez coletadas, as amostras foram encaminhadas ao Laboratório de Matéria Orgânica e Resíduos, do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, onde as análises foram processadas.

Todos os dados obtidos foram submetidos à análise de variância ($p < 0,10$), seguida de análise de regressão, buscando-se avaliar o efeito das doses, tempo e interação dose e tempo sobre as variáveis em estudo. O programa estatístico utilizado foi o SAEG 9.1 (UFV, 2007).

3. Resultados e Discussão

O aporte de material orgânico via aplicação de biossólidos provocou o aumento dos teores de CO do solo (Figura 1) e do N total (Figura 2) em todas as épocas de amostragem. Tal condição para fins de recuperação de áreas degradadas é importante, pois a matéria orgânica é um componente fundamental para a qualidade do solo, com impactos positivos nas características físicas, químicas e biológicas do solo, criando condições mais apropriadas para o (re)estabelecimento da vegetação.

Em muitos trabalhos os biossólidos são apresentados como condicionadores, pela possibilidade de incrementar ou manter o teor de C no solo (AYUSO et al., 1992; DÍAZ-BURGOS e POLO, 1991; BERNAL et al., 1998 e ALBIACH et al., 2001). Tal incremento pode ser associado ao que comentam GERZABEK et al. (2001), que indicam que a matéria orgânica presente nos biossólidos está sujeita à intensiva digestão aeróbia e anaeróbia nas estações de tratamento, podendo ser considerada, portanto, relativamente recalcitrante e, uma vez no solo, vai promover rápido incremento nos teores de C no solo.

O acúmulo de C no solo em cada tratamento (dose) incrementa-se até os 270 dias de avaliação, para depois reduzir no último tempo de amostragem (360 dias). A estabilização do material, sua incorporação a camadas mais profundas (não avaliado) e mesmo sua perda via decomposição podem ser explicações para o resultado verificado.

Incremento no teor de N-total no solo após a aplicação de lodo de esgoto foi verificado por NASCIMENTO et al. (2004). No caso do N, acréscimos deste nutriente em áreas com solos degradados são relevantes para dar maior sustentabilidade à atividade biológica presente, com impactos diretos sobre a qualidade da matéria orgânica do solo.

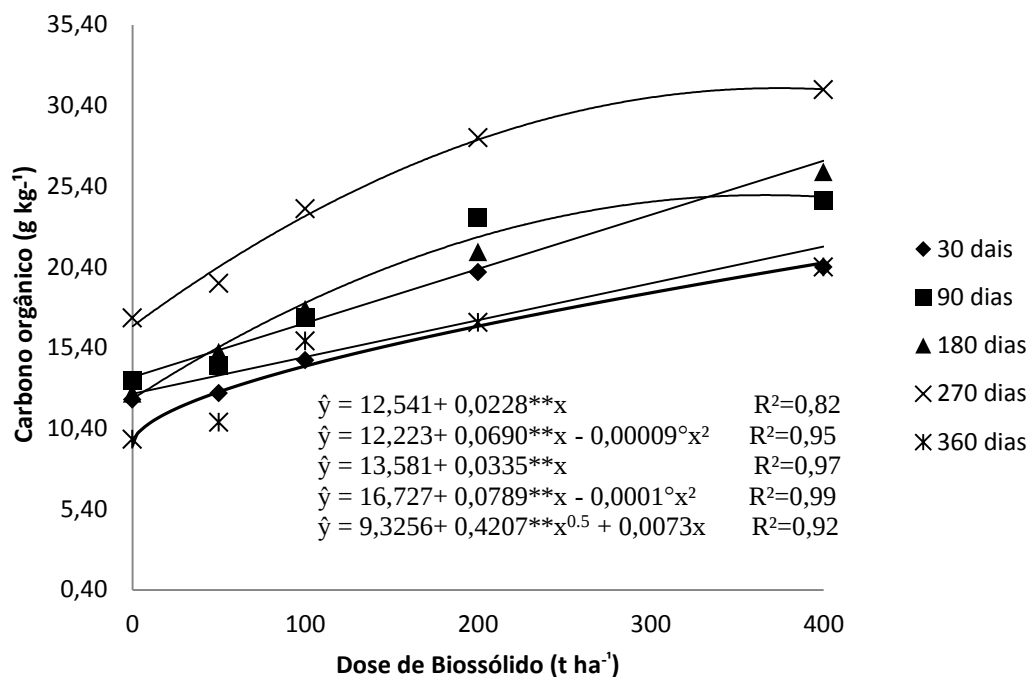


Figura 1. Carbono orgânico de solo de área degradada após aplicação de biossólido.

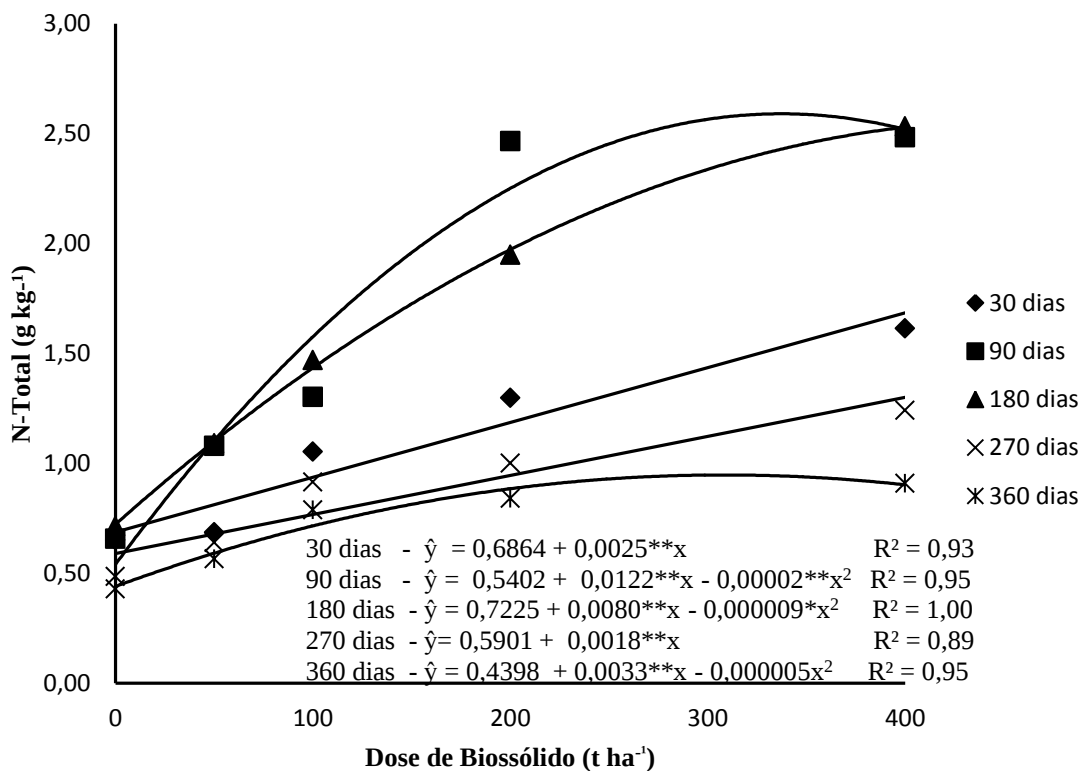


Figura 2. Teores de N total de solo de área degradada após aplicação de biossólido.

Sua presença com a adição do bio-sólido pode permitir sua liberação de forma contínua no solo, essencial para a qualidade do solo (POGGIANI et al., 2000).

Os teores de N-total no solo, nos diferentes tratamentos, aumentaram até os 180 dias de avaliação e nas avaliações subseqüentes (270 e 360 dias) observou-se um declínio, embora a tendência de elevação ou manutenção com o incremento das doses tenha se mantido. De acordo com BOEIRA e MAXIMILIANO (2007), o N presente nos lodos de esgoto encontra-se predominantemente na forma orgânica, da qual cerca de um terço são potencialmente mineralizáveis durante um cultivo agrícola (um ano), desta forma a possibilidade de perdas ou assimilação de parte do N é possível, refletindo em menores teores acumulados no solo com o passar do tempo.

Os teores de nitrato responderam de forma semelhante ao N-total à aplicação das doses crescentes de bio-sólidos (Figura 3).

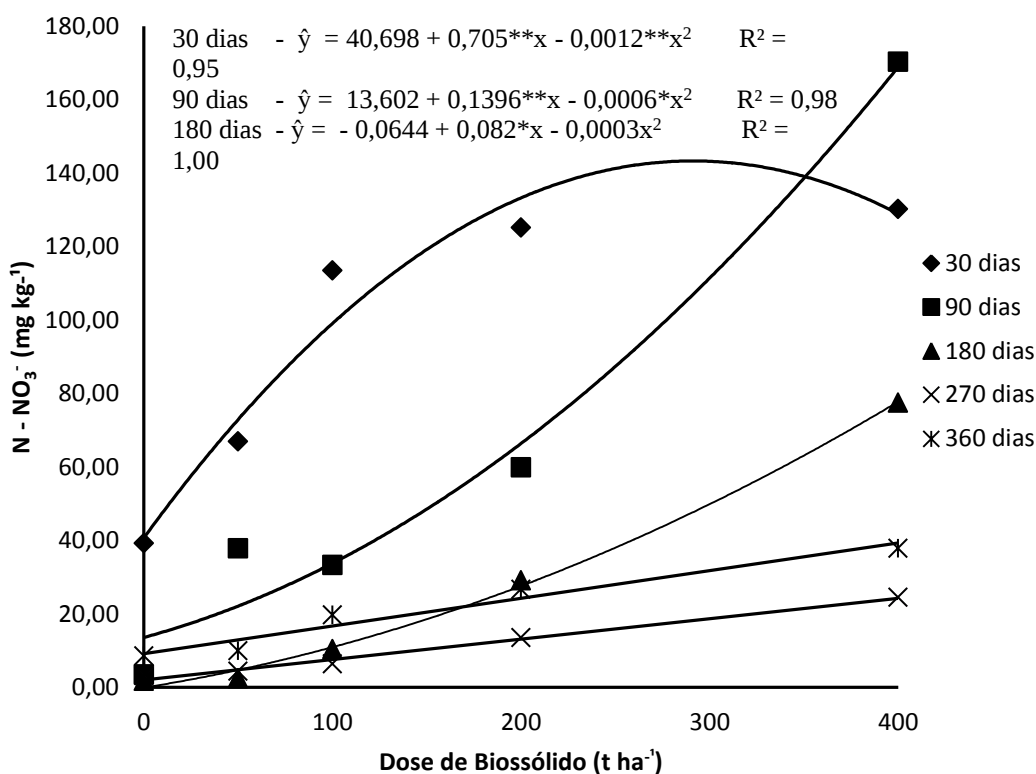


Figura 3. Teores de nitrato de solo de área degradada após aplicação de bio-sólido.

Novamente se verifica dentro de um mesmo tratamento, a redução de teores com o passar dos tempos de amostragem, sendo que nas últimas coletas (270 e 360 dias), os teores de nitrato foram inferiores aos observados nas coletas iniciais. Esses resultados podem ser associados à absorção de nitrato pelas plantas, assim como à sua possível lixiviação ao longo do perfil do solo, decorrente do aumento da precipitação e temperatura verificada nos meses de janeiro, fevereiro e março, situações climáticas que também contribuem para a diminuição do processo de nitrificação em virtude do aumento da umidade e temperatura do solo, conforme sugerido por SAHRAWAT (2008).

Os teores de amônio não foram alterados com os tratamentos impostos na primeira amostragem e aos 270 dias de avaliação (Figura 4). Nas demais épocas de amostragem, a resposta seguiu a tendência verificada para o N-total e nitrato, ou seja, aumento com o aumento da dose aplicada. Também semelhante ao verificado anteriormente nas duas últimas coletas foram obtidos menores teores de amônio dentro de um mesmo tratamento, o que pode estar associada ao processo de nitrificação, no qual o amônio é convertido a nitrato, como observado em outros estudos (KELLING et al., 1977; SHEPHERD, 1996). Por outro lado, como indicado previamente (Figura 3), os teores de nitrato não apresentaram acréscimo com o passar do tempo de avaliação. Provavelmente, os fenômenos da lixiviação e assimilação sejam a resposta para o destino do nitrato do solo, uma vez que se trata de um ânion normalmente repelido pela superfície negativa das partículas do solo e facilmente absorvido pelas plantas.

O C da biomassa microbiana (C-Bio) demorou até a terceira amostragem para apresentar resposta à aplicação do biossólido (Figura 5).

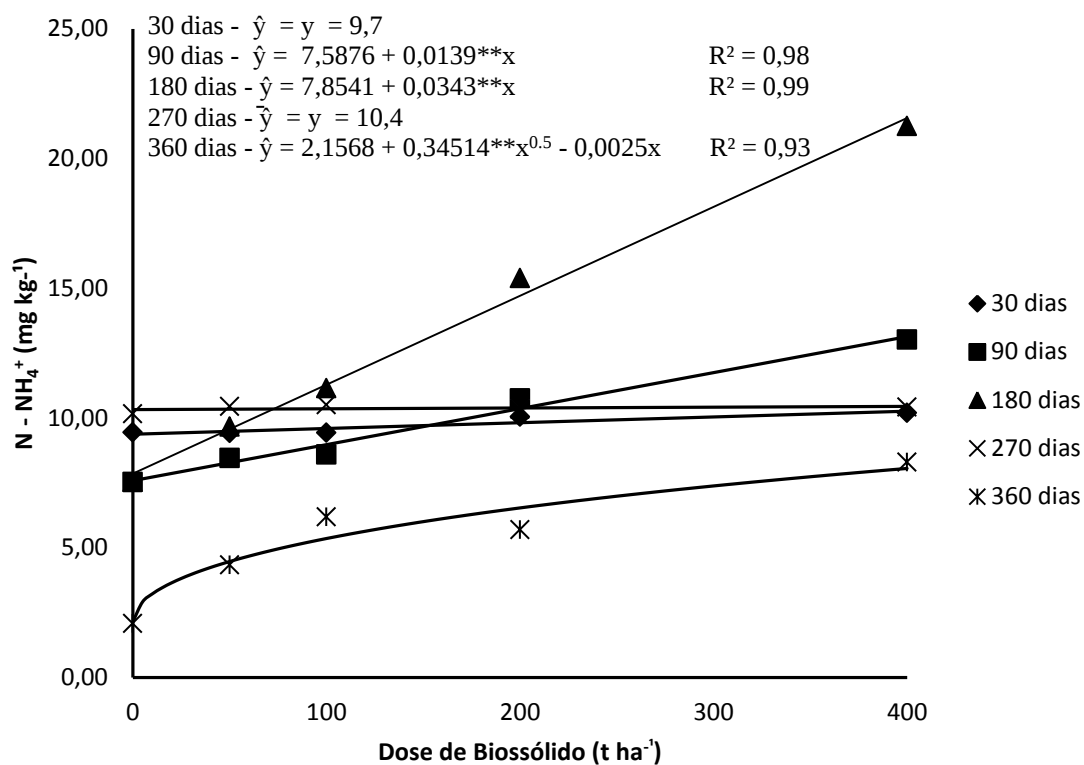


Figura 4. Teores de amônio de solo de área degradada após aplicação de biofósforo.

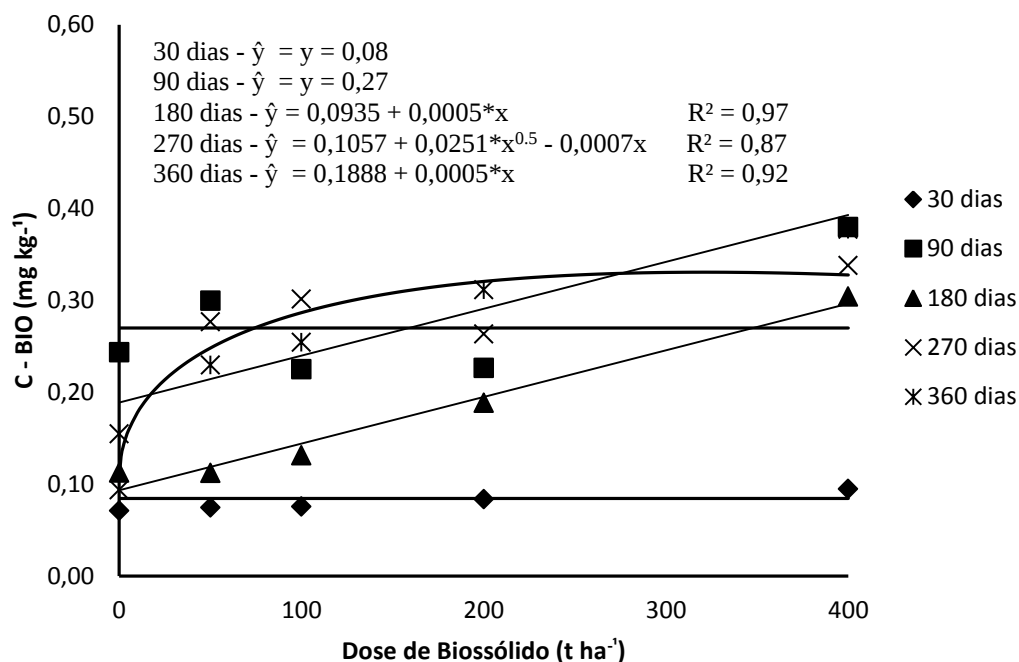


Figura 5. Teores de C da biomassa microbiana de solo de área degradada após aplicação de biofósforo.

Contudo, nos períodos subsequentes de avaliação, verificou-se incremento desta variável com o aumento das doses. Tal incremento foi linear na terceira e quarta amostragem, variando para quadrático depois de um ano, tendendo a atingir um patamar. Quando considerarmos o valor final de C-Bio alcançado na dose mais elevada (400 t ha^{-1}), após 360 dias da aplicação do bio sólido, verifica-se incremento em torno de 153 %, em relação à parcela que não recebeu bio sólido ($0,15 \text{ mg kg}^{-1}$). Incrementos significativos têm sido relatados na literatura, como no estudo de GARCÍA-GIL et al. (2000), que observaram aumento de 46 % de C-Bio em solo arenoso após a aplicação de 80 t ha^{-1} de lodo compostado durante nove anos.

Ganhos de teores de C-Bio no solo são interessantes para fins de recuperação de áreas degradadas, tendo em vista ser os micro-organismos um compartimento bastante ativo na dinâmica da matéria orgânica do solo. Adicionalmente esta variável é considerada um excelente indicador da qualidade do solo, por ser bastante variável e sensível às mudanças no manejo do solo.

A ausência de resposta aos tratamentos nas primeiras avaliações indica que o material da forma como foi aplicado não favorece, em um primeiro momento, a atividade biológica, sendo necessário algum tempo para que o crescimento microbiano se verifique. Dentro de cada tratamento aplicado também se percebem os menores teores de C-Bio na avaliação efetuada aos 30 dias. Nas avaliações seguintes os teores foram maiores, ainda que na terceira coleta tenha se verificado decréscimo nesses em relação à coleta anterior.

Os teores de N da biomassa microbiana (N-Bio) também foram incrementados com o aumento das doses de bio sólido aplicadas ao solo em todas as épocas avaliadas (Figura 6), situação similar à verificada por VIERA e CARDOSO (2003). Dentro de cada tratamento, os teores de N-Bio aumentaram com o passar do

tempo, indicando efeito positivo do biossólido na imobilização de N pela comunidade microbiana. A biomassa microbiana, embora quantitativamente pouco expressiva, apresenta grande relevância na recuperação de solos, tendo em vista que os produtos de seu metabolismo podem constituir em importantes fontes do N mineral para as plantas (JENKINSON e LADD, 1981).

Os incrementos verificados nos valores de C-MOL e, especialmente nos de N-MOL, podem ser associados à pouca recalcitrância química do biossólido, ou seja, sua própria composição não conta com algum tipo de proteção física, como a oclusão ou complexação em compostos organominerais, o que torna o material mais acessível ao ataque de microrganismos (ROSCOE e MACHADO, 2002),

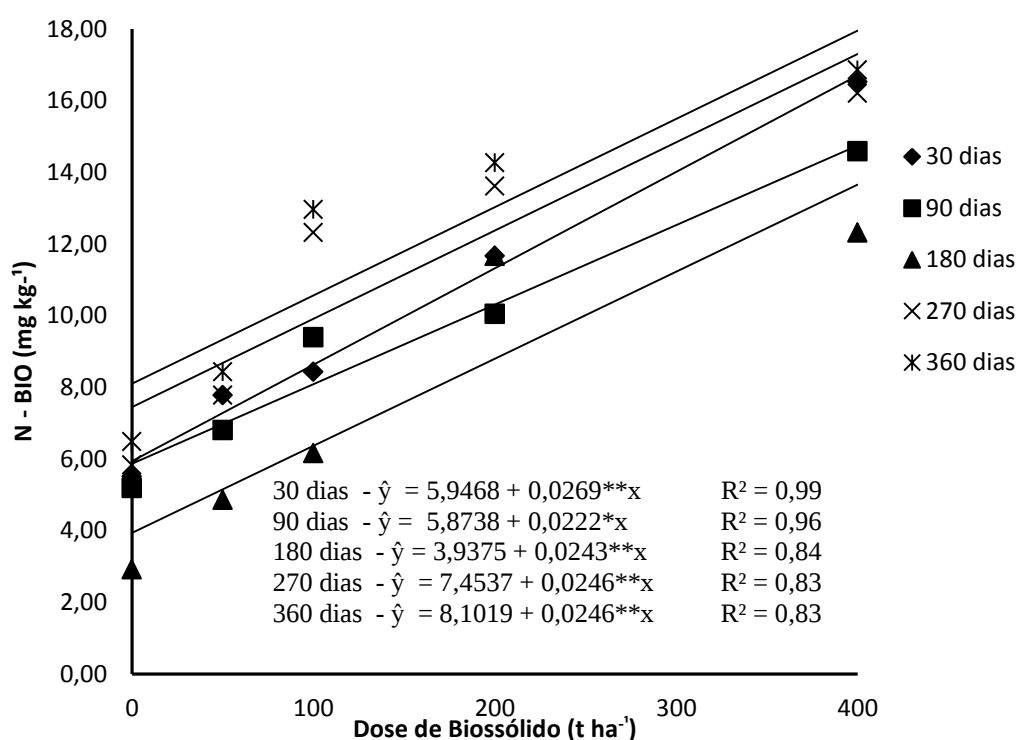


Figura 6. Teores de N da biomassa microbiana de solo de área degradada após aplicação de biossólido.

A presença de matéria orgânica leve (MOL) também foi incrementada com o aumento das doses de biossólido, em todos os períodos de amostragem, a exceção da avaliação efetuada aos 270 dias (Figura 7). Entretanto, dentro de um mesmo tratamento, a MOL foi reduzida a partir dos 180 dias, em comparação às duas avaliações iniciais.

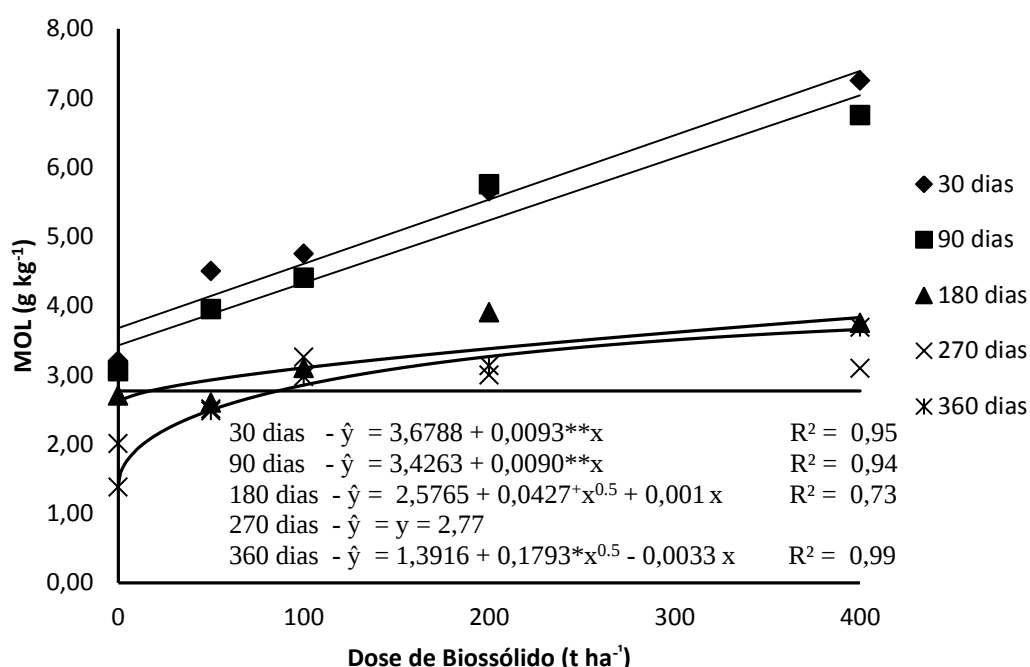


Figura 7. Quantidade de matéria orgânica leve (MOL) do solo de área degradada após aplicação de biossólido.

A MOL representa um dos indicadores mais responsivos às alterações da qualidade do solo, por constituir um compartimento mais lábil da matéria orgânica (STEVENSON, 1994). Tal responsividade é confirmada nas primeiras avaliações, onde o teor de MOL incrementa-se bastante. Entretanto, com o passar do tempo os teores

são reduzidos, tendo em visto a própria dinâmica do material orgânico que, em solos mais intemperizados, sofre com um processo de reciclagem mais acelerada, comprometendo seu acúmulo no solo. Desta forma, a MOL apresenta uma meia-vida reduzida no solo, sendo muito afetada por fatores que governam a decomposição da matéria orgânica, em especial temperatura e a umidade do solo, além de ser afetada também por aspectos ligados à quantidade e à composição química do resíduo aplicado.

Os teores de C associado à matéria orgânica leve do solo (C-MOL) foram pouco alterados com o incremento das doses de biossólidos nas diferentes amostragens efetuadas, embora um enriquecimento de C na composição da MOL tenha sido verificado com o passar do tempo (Figura 8), como produto do próprio processo de humificação. Em termos de composição média, os teores de C-MOL, variando de 13,75 g kg⁻¹ a 31,59 g kg⁻¹, são comuns para este tipo de compartimento da matéria orgânica, sendo semelhante ao verificado em outros estudos (LEITE, 2001; PINHEIRO et al., 2004).

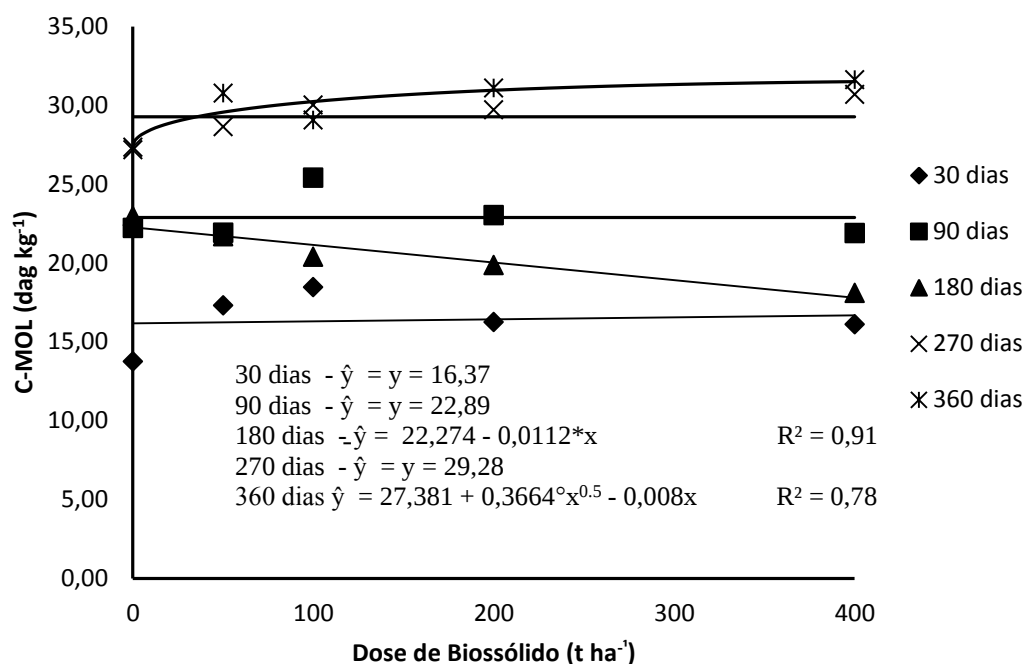


Figura 8. Quantidade de C associada a matéria orgânica leve do solo (C-MOL) de área degradada após aplicação de biofósforo.

Os teores de N associados a matéria orgânica leve do solo (N-MOL) também foram incrementados com o aumento das doses, e ao longo do tempo, dentro de um mesmo tratamento, verificou-se incrementos de N na MOL (Figura 9).

Verificaram-se efeitos da aplicação de doses crescentes de biofósforo incrementando os teores de C e N associados às substâncias húmicas - ácido húmico, ácido fúlvico e humina, ao longo dos tempos de amostragem avaliados (Figuras 10, 11, 12, 13, 14 e 15). A adição do biofósforo favorece o estoque de C e N no solo, e seu armazenamento nas frações húmicas traz implicações positivas quanto ao esperado papel de dreno do solo. A presença destes elementos químicos em formas mais estáveis de matéria orgânica, reduz um pouco sua mobilidade e permite seu acúmulo no solo.

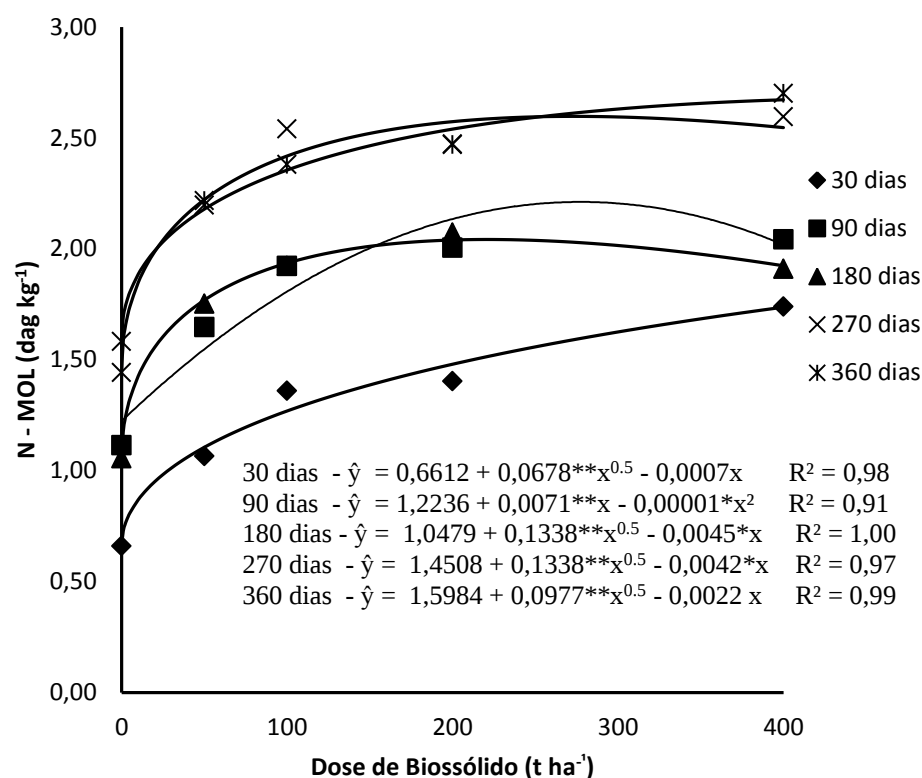


Figura 9. Quantidade de N associado a matéria orgânica leve do solo (N-MOL) de área degradada após aplicação de biossólido.

O tempo de amostragem após a aplicação do biossólido influenciou os resultados de C e N presente nas frações húmicas, dentro de cada tratamento avaliado. Na primeira avaliação, 30 dias da aplicação do biossólido, no geral verificou-se, com o passar do tempo, redução dos teores de C nas frações ácido fúlvico (Figura 10) e ácido húmico (Figura 11), e incremento na humina (Figura 12). Para os teores de N, enquanto o incremento foi bastante evidente na humina (Figura 15) com o passar do tempo, nas frações ácido fúlvico (Figura 13) e ácido húmico (Figura 14) a redução não foi tão clara. Tanto para o C como para o N, as reduções, ainda que ligeiras, verificadas nas frações ácido fúlvico e ácido húmico com o tempo podem significar a transformação destas formas na humina, que é mais estável no solo. Entretanto, os ganhos mais expressivos de teores de C e N na humina revelam que esta transformação se deu rapidamente para esta fração da matéria orgânica.

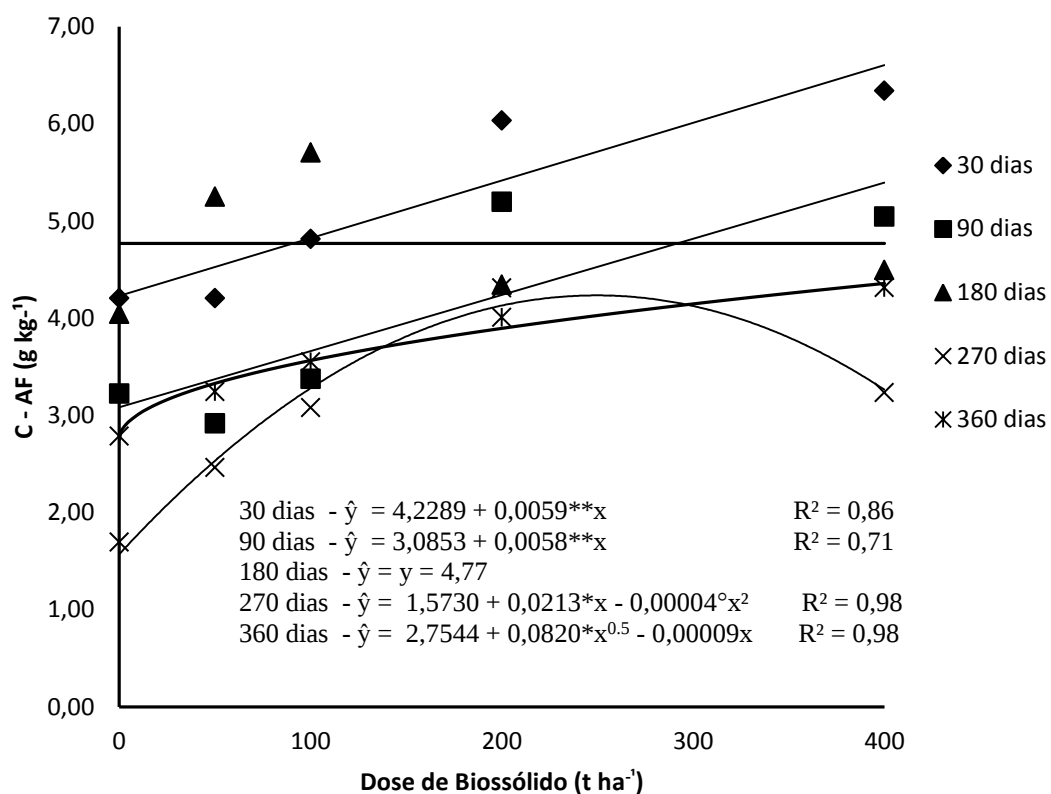


Figura 10. Quantidade de C associado a fração ácido fúlvico (C-AF) do solo de área degradada após aplicação de biossólido.

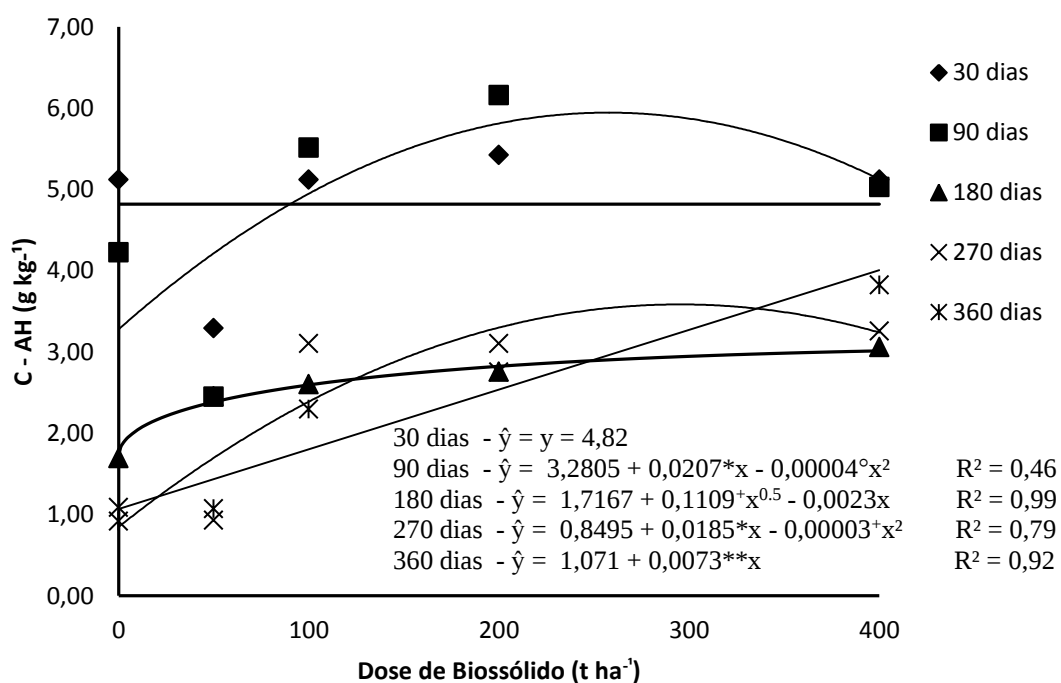


Figura 11. Quantidade de C associado a fração ácido húmico (C-AH) do solo de área degradada após aplicação de biossólido.

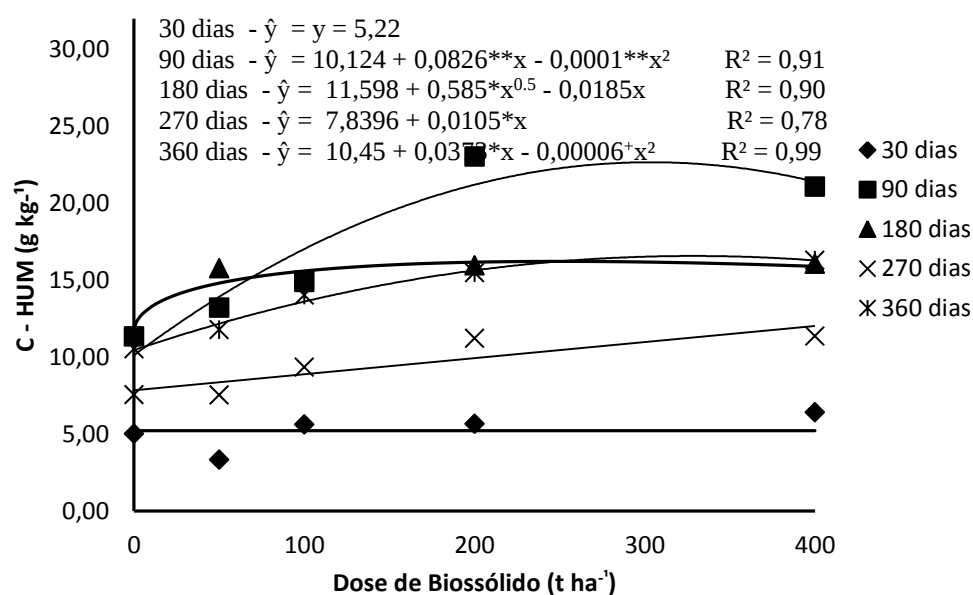


Figura 12. Quantidade de C associado a fração humina (C-HUM) do solo de área degradada após aplicação de biossólido.

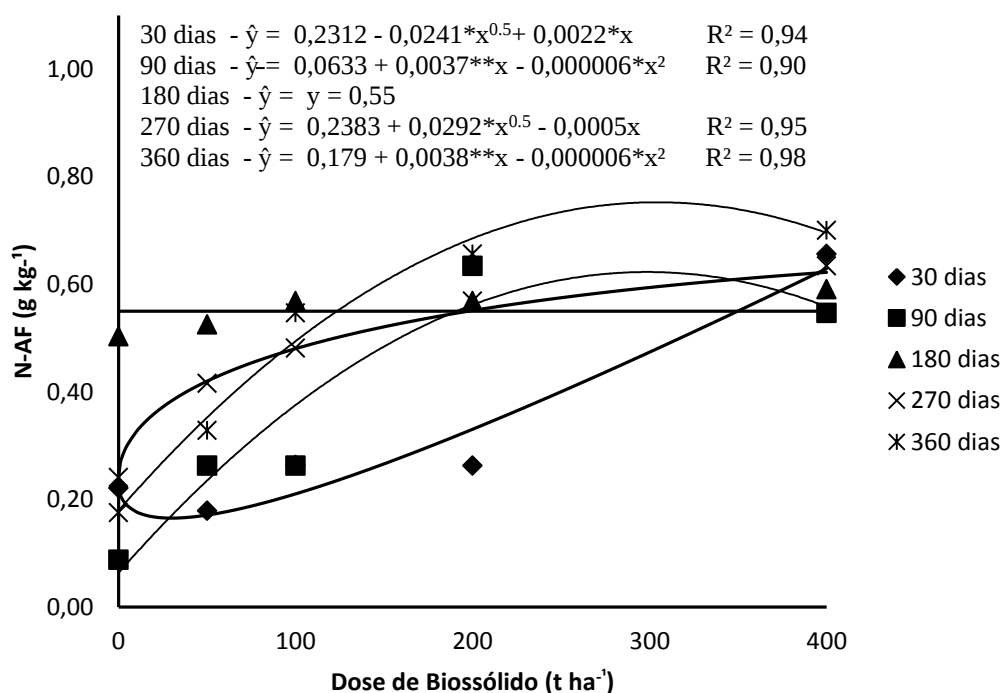


Figura 13. Quantidade de N associado a fração ácido fúlvico (N-AF) do solo de área degradada após aplicação de biossólido.

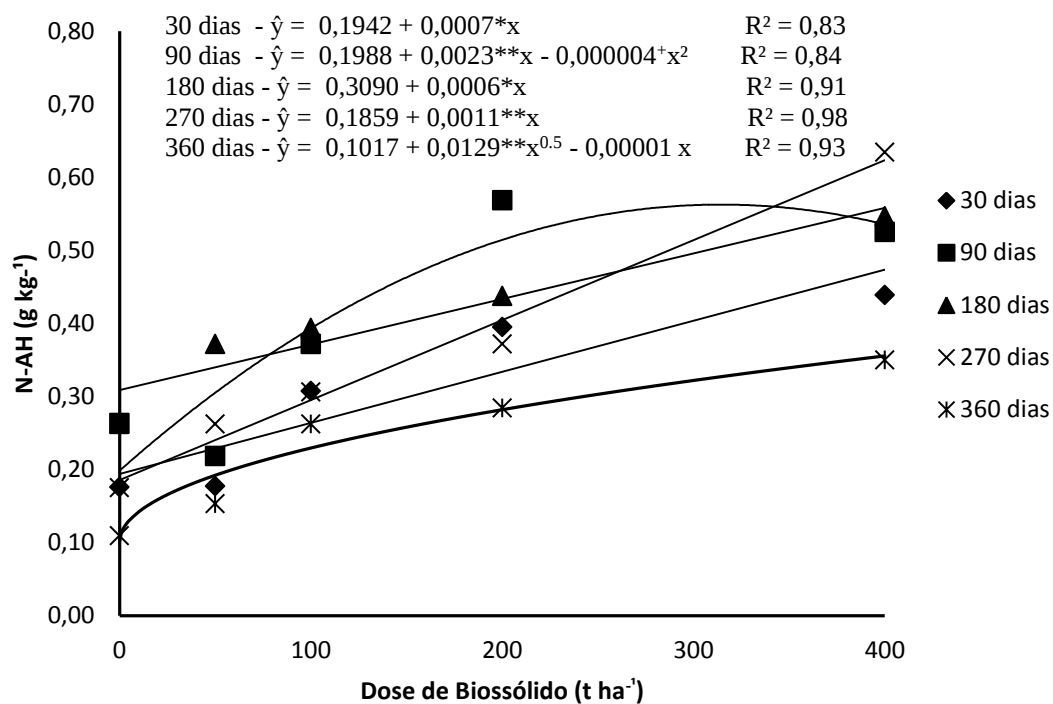


Figura 14. Quantidade de N associado a fração ácido húmico (N-AH) do solo de área degradada após aplicação de biofósforo.

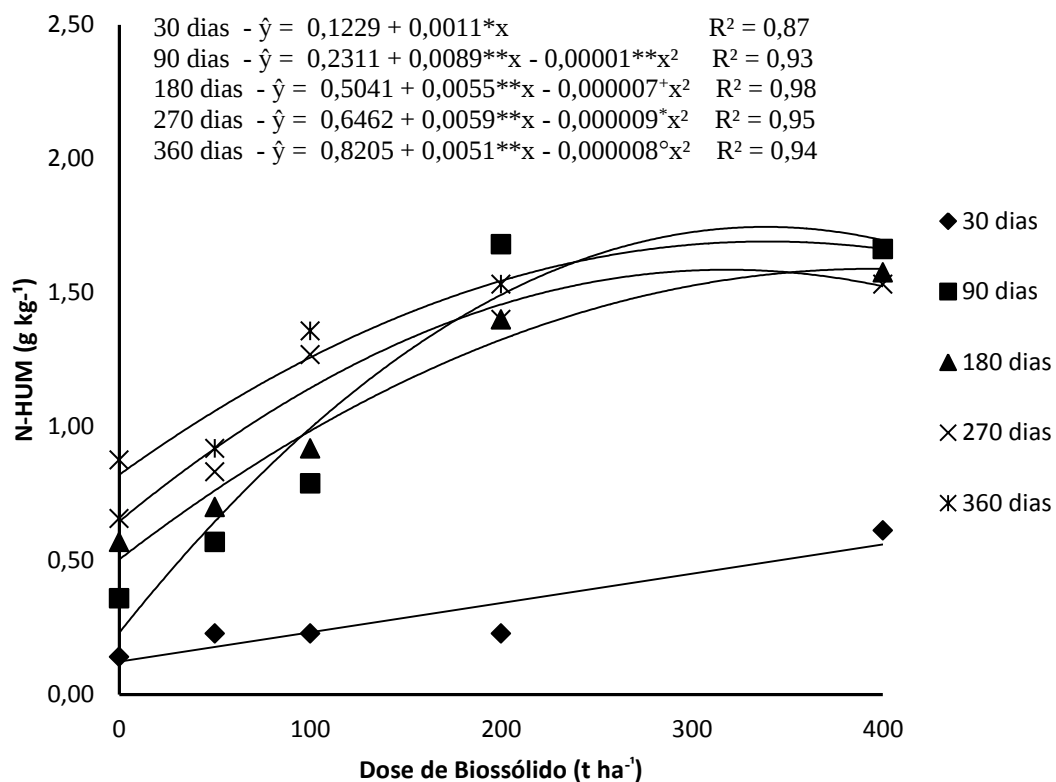


Figura 15. Quantidade de N associado a fração humina (N-HUM) do solo de área degradada após aplicação de biofósforo.

Do ponto de vista ambiental, o armazenamento de C e N na humina é interessante, por se tratar da fração mais estável da matéria orgânica do solo. No solo em estudo e em outros de solos cultivados ou de ambientes naturais no Brasil, o predomínio da humina se faz presente (BENITES et al., 2003). Do ponto de vista da recuperação de solos de áreas degradadas, maiores teores de C na forma de C-HUM favorece as propriedades da fração coloidal da matéria orgânica do solo, com benefícios decorrentes, tais como retenção de umidade, melhor estruturação do solo e maior retenção de cátions (SOUZA e MELO, 2003).

4. Conclusões

- 1- A aplicação de biossólido promoveu incremento inicial dos teores de N total, amônio e nitrato no solo da área degradada, que foram sendo reduzidos com o passar do tempo.
- 2- A aplicação de biossólido promoveu incrementos dos teores de C e N da biomassa microbiana e da matéria orgânica leve, que se mantiveram com o tempo de incorporação do biossólido.
- 3- A aplicação de biossólido promoveu incrementos no estoque de C e N armazenado nas substâncias húmicas, em especial na fração humina.

5. Bibliografia

- ALBIACH, R.; CONET, R.; POMARES, F.; INGELMO, F. Decomposition of different organic materials in soils. *Biology and Fertility of soils*, v.18, p.175-182, 1994.
- AYUSO, M.; HERNANDEZ, T.; GARCIA, C.; COSTA, F. Utilización d'un lodo aerobio como substitutivo de fertilizantes fosforados inorgánicos. *Suelo y Planta*, v.2, p.271-280, 1992.
- BAI Z. G.; DENT D. L.; OLSSON L. & SCHAEPMAN M. E. Global assessment of land degradation and improvement. 1. Identification by remote sensing. Report 2008/01, ISRIC – World Soil Information, Wageningen. 2008. 78p.
- BENITES, V.M.; MÁDARI, B.; MACHADO, P.L.O.A. 2003. Extração e fracionamento quantitativo de substâncias húmicas do solo: um procedimento simplificado de baixo custo. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 7p. (Embrapa Solos. Comunicado técnico, 16).
- BERNAL, M. P.; SÁNCHEZ-MONEDERO, M. A.; PAREDES, C.; ROIG, A. carbon mineralization from organic wastes at different composting stages during their incubation with soil. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v.69, p.175-189, 1998.
- BOEIRA, R. C. & MAXIMILIANO, V. C. B. Nitrogênio residual no solo após quatro aplicações de lodo de esgoto. *Rev. Bras. Agroecologia*, v.2, n.1, p.244 –247, 2007.
- CARVALHO, P. H. T.; BARRAL, M. F. Aplicação de lodo de esgoto como fertilizante. *Fertilizantes*. São Paulo, v.3, n. 2, p.1-4. 1981.
- CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução Nº 375/2006 - "Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras

providências". 32p., 2006 Disponível em www.mma.gov.br/port/conama/res/res06/res37506.pdf. Consultado em 06/12/2010.

DÍAZ-BURGOS, M. A.; POLO, A. Variaciones de la fracción orgánica durante el compostaje de lodos de depuradoras. *Suelo y Planta*, v.1, p.453-466, 1991.

GARCÍA-GIL, J.C.; PLAZA, C.; SOLER-ROVIRA, P. & POLO, A. Long-term effects of municipal solid waste compost application on soil enzyme activities and microbial biomass. *Soil Biol. Biochem.*, v.32, p.1907-1913, 2000.

GERZABEK, M.H.; HABERHAUER, G. & KIRCHMANN, H. Soil organic matter pools and carbon-13 natural abundances in particle-size fractions of a long-term agricultural field experiment receiving organic amendments. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v.65, p.352-358, 2001.

JENKINSON, D. S.; LADD, J. N. Microbial biomass in soil: measurement and turnover. In: Paul, E.A.; Ladd J. N (eds). *Soil biochemistry*. Marcel Dekker, p. 425-471, 1981.

KELLING, K. A.; WALSH, L. M.; KEENEY, D. R.; RYAN, J. A. & PETERSON, A. E. A field study of the agricultural use of sewage sludge: II. Effect on soil N and P. *Journal of Environmental Quality*, v.6, p.345-352, 1977.

LEITE, L. F. C. Compartimentos e dinâmica da matéria orgânica do solo sob diferentes manejos e sua simulação pelo modelo Century. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa. 2001. 146p. Tese (Doutorado).

MELO, W. J. de, MARQUES, M. O., MELO, V. P. O uso agrícola do biossólido e as propriedades do solo. In: *Biossólidos na Agricultura*. TSUTIYA, M. T.; COMPARINI, J. B.; SOBRINHO, P. A.; HESPANHOL, I.; CARVALHO, P. C. T.; MELO, A. J. & MARQUES, M. O. (Eds.). 1ª ed., São Paulo: SABESP, 2001. 468p.

MENDONÇA, E.S. & MATOS, E.S. *Matéria orgânica do solo: métodos de análises*. 1. ed. Ponte Nova: D&M Gráfica e Editora Ltda. 2005. 107p.

NASCIMENTO, C. W. A.; BARROS, D. A. S.; MELO, E. E. C. & OLIVEIRA, A. B. Alterações químicas em solos e crescimento de milho e feijoeiro após aplicação de lodo de esgoto. *R. Bras. Ci. Solo*, v.28, p.385-392, 2004.

OLDEMAN, L. R. The global extent of soil degradation. In: GREENLAND, D. J. & SZABOCLS, I., eds. *Soil resilience and sustainable land use*. Wallingford, Cab International, p.99-118. 1994.

PINHEIRO, E.F.M.; PEREIRA, M.G.; ANJOS, L.H.C.; MACHADO, P.L.O. de A. Fracionamento densimétrico da matéria orgânica do solo sob diferentes sistemas de manejo e cobertura vegetal em Paty do Alferes (RJ). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.28, p.731-737, 2004.

POGGIANI, F.; GUEDES, M. C. & BENEDETTI, V. Aplicabilidade de biossólido em plantações florestais: I. Reflexo no ciclo dos nutrientes. In: BETTIOL, W. & CAMARGO, O. A. *Impacto Ambiental do Uso Agrícola do Lodo de Esgoto*, Jaguariúna, SP: EMBRAPA Meio Ambiente, p.163-178, 2000.

ROSCOE, R.; MACHADO, P. L. O. de A. Fracionamento físico do solo em estudos da matéria orgânica. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002. 86p.

- SAHRAWAT, K.L. Factors Affecting Nitrification in Soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal*, v.39, p.1436-1446, 2008.
- SHEPHERD, M. A. Factors affecting nitrate leaching from sewage sludges applied to a sandy soil in arable agriculture. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v.58, p.171-185, 1996.
- SOARES, E.M.B. Impacto de aplicações sucessivas de lodo de esgoto sobre os compartimentos de carbono orgânico em Latossolo cultivado com milho. Lavras, Universidade Federal de Lavras, 2005. 84p.
- SOARES, E. M. B.; SILVA, C. A.; DIAS, B. O.; BETTIOL, W. & BELIZÁRIO, M. H. Frações da matéria orgânica de Latossolo sob influência de doses de lodo de esgoto. *Pesq. Agropec. Bras.*, Brasília, v.43, p.1231-1240, 2008.
- SOUZA, W.J.O.; MELO, W.J. Matéria orgânica em um Latossolo submetido a diferentes sistemas de produção. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.27, p.1113-1122, 2003.
- STEVENSON, F.J. *Humus chemistry: genesis, composition, reactions*. 2.ed. New York: John Wiley & Sons, 1994. 496p.
- TAMANINI, C. R. Recuperação de áreas degradadas com a utilização de biossólidos e gramínea forrageira. Curitiba: Universidade Federal do Paraná. 2004. 181p. (Dissertação de mestrado).
- TSUTIYA, M. T. Alternativas de disposição final de biossólido. In: TSUTIYA, M. T.; COMPARINI, J. B.; SOBRINHO, P. A.; HESPANHOL, I.; CARVALHO, P. C. T.; MELFI, A. J.; MELO, W. J. & MARQUES, M. O. (Eds.). *Biossólidos na agricultura*. São Paulo, SABESP, Escola Politécnica – USP, ESALQ, UNESP, p.133-180. 2001.
- UFV - UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA - SAEG - Sistema para Análises Estatísticas. Versão 9.1. Fundação Arthur Bernardes. Viçosa: UFRV, 2007. Disponível em: <http://www.ufv.br/saeg/> Consultado em 22/06/2011.
- VIEIRA, R. F. & CARDOSO, A. A. Variações nos teores de nitrogênio mineral em solo suplementado com lodo de esgoto. *Pesq. Agropec. Bras.*, v.38, p.867-874, 2003.

CAPÍTULO 3

EMISSÃO DE CO₂ DE AMOSTRAS DE SOLO EM RESPOSTA A ADIÇÃO DE BIOSSÓLIDO

RESUMO

HOFFMANN, Ricardo Bezerra, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2012. **Emissão de CO₂ de amostras de solo de área degradada em resposta a adição de biossólido.** Orientador: Raphael Bragança Alves Fernandes. Co-orientadores: Maurício Paulo Ferreira Fontes, Nerilson Terra Santos e Eduardo de Sá Mendonça.

Os centros urbanos são importantes produtores de diversos resíduos, cuja destinação tem sido um grande desafio para os gestores públicos. Dentre as alternativas de disposição final, a aplicação no solo é uma opção interessante quando o resíduo apresenta características desejáveis, sendo este o caso do biossólido. O objetivo desse trabalho foi avaliar a liberação de CO₂ de solos de áreas degradadas, após a aplicação e incorporação de doses crescentes de biossólidos. Ensaio de campo e de casa de vegetação foram conduzidos. No campo, em um solo de área degradada foram montadas 20 parcelas, que receberam aplicação de cinco doses (0, 50, 100, 200 e 400 t ha⁻¹) de biossólido, com quatro repetições. Aos 30, 90, 180, 270 e 360 dias, amostras foram coletadas para a avaliação da evolução de C-CO₂ em laboratório. Em casa de vegetação, amostras de três solos representativos do Distrito Federal (Latosolo Vermelho Amarelo, Latossolo Vermelho e Cambissolo Háplico) foram dispostas em colunas de PVC e receberam as mesmas doses de biossólido, e a evolução de C-CO₂ foi avaliada regularmente por cinco meses. Os resultados obtidos indicaram diferenças na evolução de C-CO₂ em resposta às doses de biossólido aplicadas e incorporadas em condição de campo em todos os períodos avaliados. No experimento de casa de vegetação, as doses incorporadas também provocaram aumento na evolução de C-CO₂ em todas as classes de solo analisadas, sem grandes diferenças entre elas, tendo em vista a homogeneidade de granulometria utilizada nas colunas. A aplicação de biossólido incrementou a mineralização da matéria orgânica do solo com impactos positivos no processo de recuperação da área degradada.

Palavras chave: respirometria, recuperação de área degradada, biossólido

ABSTRACT

HOFFMANN, Ricardo Bezerra, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, March 2012. **CO₂ emissions from soil samples of degraded areas in response to biosolids application.** Advisor: Raphael Bragança Alves Fernandes. Coadvisors: Maurício Paulo Ferreira Fontes, Nerilson Terra Santos and Eduardo de Sá Mendonça.

The disposal of the various wastes produced in urban centers represents a major challenge for policy makers. Among the possibilities for a final disposal, soil application is an interesting option in the case of desirable characteristics of the residues, such as biosolids. The purpose of this study was to evaluate the CO₂ release from soils of degraded areas after biosolids application. Field and greenhouse experiments were carried. In the field, five biosolids rates (0, 50, 100, 200 and 400 t ha⁻¹) were applied to 20 plots of a degraded soil, in four replications. After 30, 90, 180, 270, and 360 days, soil was sampled to assess the CO₂-C evolution in laboratory. In a greenhouse, PVC columns were filled with samples of three representative soils of Federal District (Red Yellow Latosol, Red Latosol and Haplic Cambisol) and received the same biosolids rates. For five months CO₂-C evolution was regularly evaluated. Results indicated differences in CO₂-C evolution after biosolid application and incorporation under field conditions in all periods evaluated. In the greenhouse experiment, application of biosolids also caused increase in CO₂-C evolution from all soil types, without differences among them, because it was used homogeneous particles size (< 4 mm) in the columns. Biosolids application increased mineralization of soil organic matter, enhancing expectations for positive effects of this residue for reclamation of degraded areas.

Key words: respirometry, land reclamation, sewage sludge

1. Introdução

Os centros urbanos são importantes produtores de diversos resíduos, cuja destinação tem sido um grande desafio para os gestores públicos. Dentre as alternativas de disposição final, a aplicação no solo é uma opção interessante quando o resíduo apresenta características desejáveis, sendo este o caso do biossólido. O biossólido é um subproduto do lodo de esgoto, que se origina nas Estações de Tratamento de Esgoto a partir do tratamento das águas residuárias domésticas urbanas. A disposição do biossólido em solo, em especial em áreas de culturas não agrícolas, pode ser interessante para a recuperação de áreas degradadas, tendo em vista sua grande quantidade de material orgânico e de nutrientes.

Uma vez no solo, o biossólido torna-se o substrato para a atividade microbiana e conhecer um pouco mais acerca desta dinâmica de decomposição do resíduo pode contribuir para com a melhor definição dos procedimentos mais adequados para sua disposição final e de seu melhor aproveitamento com vistas ao incremento da qualidade do solo. Durante a decomposição de produtos como o biossólido, os micro-organismos produzem CO_2 , cuja liberação é um indicador da atividade microbiana, do suprimento (quantitativo e qualitativo) de substratos orgânicos aos microrganismos e das interações entre a microbiota e a matriz do solo (COSTA et al., 2003; CIOTTA et al., 2004).

O CO_2 tem sido o objeto de muitos estudos mais recentes, tendo em vista que o aumento de sua concentração na atmosfera causa o agravamento do chamado efeito estufa, que provoca alterações climáticas por meio do aquecimento global, ameaçando o equilíbrio natural do planeta. Esse aumento na concentração de gases do efeito estufa na atmosfera deverá provocar, com o passar dos anos, alterações na vegetação, distúrbios nos níveis aquáticos e impactos na agricultura (HOUGHTON,

1997; JONES et al., 1998; HUNGATE et al., 2000). O IPCC (2001) indica ainda que, se não houver mudanças profundas no comportamento da humanidade, a concentração de CO₂ continuará aumentando 0,4 % a cada ano, chegando a até 700 ppm em 2100.

Dentre os reservatórios de C nos ecossistemas terrestres, o solo é o de maior expressão. Segundo dados de POST et al. (1982) e SCHLESINGER (1997), no primeiro metro de solo existe cerca de 1.300 a 1.500 Gt de carbono. Outros autores (ABDALA et al., 1998; JOBBÁGY e JACKSON, 2000) sugerem que essa contribuição possa ser ainda maior, em virtude da contribuição dos estoques de carbono no segundo e terceiro metro do perfil de alguns solos.

A principal causa mundial de liberação de CO₂ para a atmosfera é a queima de combustíveis fósseis (TOWNSEND et al., 2006). No entanto, o uso do solo e a decomposição de resíduos também são fontes de produção de CO₂ para a atmosfera. Nesse sentido, o processo de decomposição da matéria orgânica do solo afeta diretamente o ciclo e a liberação do CO₂, que pode ser incrementada com a incorporação do biossólido ao solo, por ser esse um produto com altos teores de matéria orgânica em sua constituição.

Diante do exposto, o objetivo desse trabalho foi avaliar a evolução de CO₂ de solos degradados, após a aplicação e incorporação de doses crescentes de biossólidos, buscando evidenciar as consequências potenciais da disposição deste resíduo em solo.

2. Material e Métodos

O presente trabalho foi formado por dois experimentos, um instalado em condições de campo, e outro em casa de vegetação. O experimento a campo foi conduzido no interior da Estação de Tratamento de Esgoto Recanto das Emas,

pertencente à Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB), localizada na Região Administrativa do Recanto das Emas, no Distrito Federal. A temperatura média anual da região é de 21 °C e a altitude média é de 1.100 metros. O clima é classificado como Aw (Tropical de Savana), segundo a classificação de Köppen, apresentando duas estações bem definidas, uma fria e seca (entre maio e setembro) e outra quente e úmida (entre outubro e abril). O experimento foi instalado em setembro de 2009 e conduzido por um ano em um Latossolo Vermelho Amarelo de área degradada (cascalheira), textura argilosa, cujas principais características químicas e físicas são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Principais características químicas e físicas do solo da área degradada em estudo.

Características	Unidade	Profundidade	
		0 – 20 cm	20 – 40 cm
Matéria Orgânica	dag kg ⁻¹	1,16	0,52
pH(H ₂ O)		5,41	5,29
P-Mehlich-1	mg dm ⁻³	0,70	0,40
K	mg dm ⁻³	19,00	17,00
Na	mg dm ⁻³	20,60	2,80
Ca ²⁺	cmol _c dm ⁻³	0,86	0,66
Mg ²⁺	cmol _c dm ⁻³	0,12	0,10
Al ³⁺	cmol _c dm ⁻³	0,00	0,00
(H+Al)	cmol _c dm ⁻³	2,30	0,80
SB	cmol _c dm ⁻³	1,12	0,81
V	%	32,70	50,30
Argila	dag kg ⁻¹	49	47
Silte	dag kg ⁻¹	14	16
Areia fina	dag kg ⁻¹	16	14
Areia grossa	dag kg ⁻¹	21	23
Densidade de partículas	kg dm ⁻³	2,70	2,70
Densidade do solo	kg dm ⁻³	1,12	1,09

Para receber os tratamentos, o solo foi previamente nivelado e preparado com duas gradagens superficiais, sendo na sequência efetuado o piqueteamento das unidades experimentais (UEs), com dimensões de 5 x 4 m, totalizando 20 m². Os tratamentos constaram da aplicação de cinco doses de biossólido, equivalentes a 0, 50, 100, 200 e 400 t ha⁻¹ (base seca), com quatro repetições. O biossólido utilizado nesse trabalho é um subproduto de lodo de esgoto que passou por tratamento por meio de um reator anaeróbico de fluxo ascendente. A caracterização do biossólido utilizado no experimento está apresentada na Tabela 2.

Tabela 2. Características químicas e física do biossólido utilizado no experimento e seus valores máximos * permitidos no lodo de esgoto ou produto derivado

Característica	Unidade	Biossólido	CONAMA*
pH		8,93	-
Sólidos totais	%	15,39	-
C	%	36,48	-
N	%	1,22	-
P(P ₂ O ₅)	%	0,47	-
K	%	0,29	-
Ca	%	1,12	-
Mg	%	0,31	-
Al	%	2,65	-
Na	mg kg ⁻¹	554,98	-
Cu	mg kg ⁻¹	183,80	1.500
Zn	mg kg ⁻¹	647,86	2.800
Mn	mg kg ⁻¹	128,43	-
Fe	mg kg ⁻¹	26.845,87	-
Cd	mg kg ⁻¹	5,77	39
Ni	mg kg ⁻¹	14,43	420
Pb	mg kg ⁻¹	46,34	300
Cr	mg kg ⁻¹	45,25	1.000

* Com base na Resolução CONAMA n.375/2006.

O biossólido foi incorporado ao solo manualmente a uma profundidade média estimada de 10 cm, com auxílio de pás e enxadas. As avaliações de evolução de CO₂ foram efetuadas nos seguintes períodos de amostragem: 30, 90, 180, 270 e 360 dias após a incorporação do biossólido. O delineamento experimental foi o de blocos casualizados, com parcelas subdivididas no tempo.

Na avaliação da liberação de C-CO₂ em campo utilizou-se a metodologia descrita em MENDONÇA e MATOS (2005), a partir da respirometria de amostras incubadas de solo, procedimento executado no Laboratório de Matéria Orgânica e Resíduos, do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa.

O experimento em casa de vegetação foi conduzido nas dependências da Universidade Federal de Viçosa (UFV), município de Viçosa, Minas Gerais. A temperatura média anual da região é de 20 °C e a altitude média é de 663 metros. O clima da região, de acordo com a classificação de Köppen, é o Cwa – Clima Mesotérmico, caracterizado por verões quentes e úmidos e invernos frios e secos, com precipitação média anual de 1.200 mm. O experimento foi conduzido durante cinco meses, com início em abril de 2010, sendo avaliadas três classes de solos representativos do Distrito Federal: Latossolo Vermelho Amarelo (LVA), Latossolo Vermelho (LV) e Cambissolo Háplico (CX), cujas características físicas e químicas são apresentadas na Tabela 3.

Para instalação das unidades experimentais, cada solo foi seco ao ar e passado em peneira de 4 mm. Na sequência o solo foi depositado em colunas de PVC de 10 cm de diâmetro e 30 cm de altura, que receberam os tratamentos correspondentes à aplicação de cinco doses de biossólido, equivalentes a 0, 25, 50, 100 e 200 t ha⁻¹ (base seca) incorporados nos cinco primeiros centímetros superficiais. Todas as UEs

foram mantidas com umidade próxima da capacidade de campo durante o experimento.

Tabela 3. Principais características químicas e físicas, na profundidade de 0-20 cm, dos solos de áreas degradadas do experimento de casa de vegetação

Características	Unidade	LVA	Solos LV	CX
Matéria Orgânica	dag kg ⁻¹	0,65	1,81	0,26
pH(H ₂ O)		5,54	5,40	5,24
P-Mehlich-1	mg dm ⁻³	0,40	0,30	0,50
K ⁺	mg dm ⁻³	10,00	12,00	8,00
Na ⁺	mg dm ⁻³	0,00	0,00	3,90
Ca ²⁺	cmol _c dm ⁻³	0,08	0,14	0,30
Mg ²⁺	cmol _c dm ⁻³	0,54	0,61	0,61
Al ³⁺	cmol _c dm ⁻³	0,00	0,00	1,04
(H+Al)	cmol _c dm ⁻³	1,40	2,80	2,80
SB	cmol _c dm ⁻³	0,65	0,78	0,95
V	%	31,70	21,80	25,30
Argila	dag kg ⁻¹	54	72	45
Silte	dag kg ⁻¹	44	21	46
Areia fina	dag kg ⁻¹	1	5	3
Areia grossa	dag kg ⁻¹	1	2	6
Densidade de partículas	kg dm ⁻³	2,51	2,41	2,60
Densidade do solo	kg dm ⁻³	1,08	1,04	1,13

A emissão de CO₂ foi quantificada com auxílio de um analisador de fluxo de CO₂ no solo (IRGA - LI 8100), com leituras efetuadas, inicialmente, a cada dois dias no primeiro mês; passando para a cada quatro dias, no segundo mês; para a cada sete dias no terceiro e quarto mês e, sendo de 15 em 15 dias, no quinto mês. O equipamento fornece o fluxo de CO₂ em mol/m² s e, para a apresentação dos

gráficos, os dados obtidos no momento da leitura foram considerados como constantes ao longo tempo desde a última leitura. Desta forma, foram produzidos gráficos de dados acumulados da emissão de CO₂. A superfície de resposta do fluxo de CO₂ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) também foi estimada a partir dos valores obtidos de emissão, em função das doses aplicadas e do tempo decorrido, após a aplicação do bio sólido.

O delineamento experimental utilizado em casa de vegetação foi o de blocos casualizados, com parcelas subdivididas no tempo, e quatro repetições. Todos os dados foram submetidos à análise de variância, seguida de análise de regressão, buscando avaliar o efeito das doses, tempo e interação dose e tempo sobre as variáveis em estudo. O programa estatístico utilizado foi o SAEG 9.1 (UFV, 2007).

3. Resultados e Discussão

A evolução de C-CO₂ acumulada respondeu à incorporação de doses crescentes de bio sólido, em todos os períodos avaliados, durante o experimento de campo. Em todas as amostragens, a resposta foi positiva em resposta à adição do resíduo (Figura 1).

Na terceira avaliação, aos 180 dias, verificaram-se os menores valores de fluxo de C-CO₂ dentre todas as épocas de amostragem. Esse período coincide com a redução da precipitação com a estação seca, com impactos diretos sobre umidade do solo, e reduzindo a atividade de micro-organismos no solo, com reflexos diretos na produção de C-CO₂ respirado. Nas coletas seguintes, nota-se aumento na evolução de C-CO₂, provavelmente, em virtude do aumento da cobertura vegetal com a chegada das chuvas. Na parcela testemunha verifica-se a mesma situação indicada previamente para o fluxo de C-CO₂. Da mesma forma, nesta parcela que não recebeu

biossólido o efeito da umidade do solo, que depende das precipitações, também não pode ser desconsiderado.

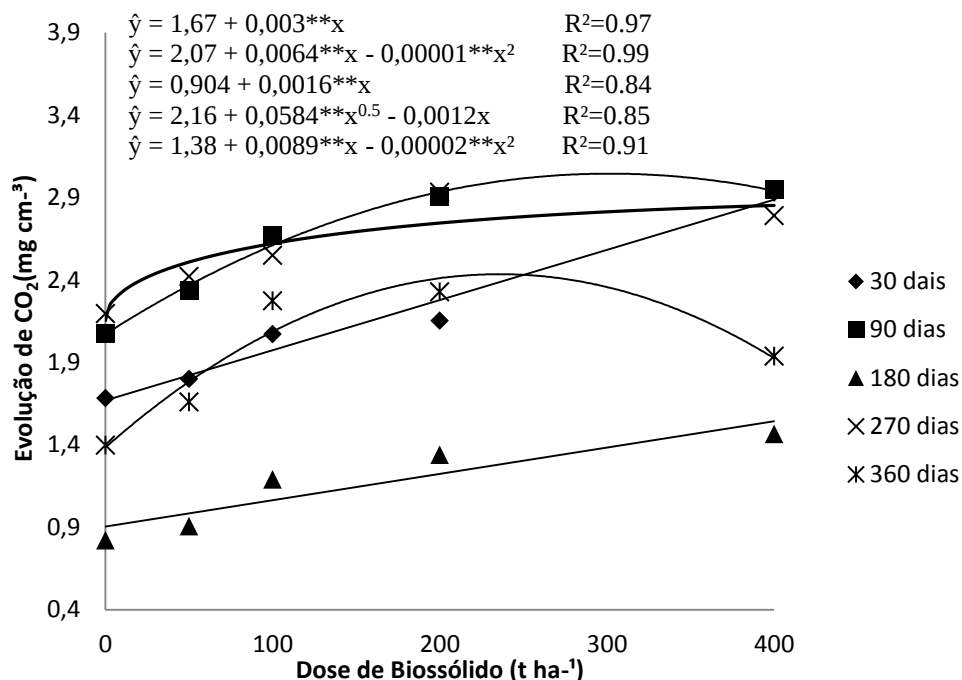


Figura 1. Evolução do C-CO₂ obtido por respirometria em solo de área degradada após aplicação de doses crescentes de biofósforo em condições de campo.

No experimento de casa de vegetação, as doses incorporadas ao solo também provocaram aumento na evolução de C-CO₂ (Figura 2) na avaliação acumulada, com as classes de solos não apresentando grandes diferenças quanto ao fluxo do gás evoluído. Embora se considere que exista, na emissão de CO₂, grande dependência do tipo e das características do solo (WEITZ et al., 2001; DOBBIE & SMITH, 2003, SIQUEIRA NETO, 2006), os dados obtidos não sugerem tal efeito. Ainda que havendo diferenças marcantes de textura (Tabela 3), que por si só poderiam sugerir diferenças de CO₂ evoluído, pela maior ou menor proteção do C nos solos, o material deformado e de granulometria uniforme (< 4 mm) pode ter promovido uma homogeneização das amostras, mascarando possíveis efeitos de classe de solo.

De uma forma geral, os ganhos em termos de evolução de C-CO₂, na maior dose aplicada (400 t ha⁻¹), foram de três a seis vezes com relação à testemunha, que não recebeu a incorporação de biossólido. Esses dados sugerem a necessidade de mais precaução quanto da recomendação do biossólido, dado seu potencial de liberação deste gás.

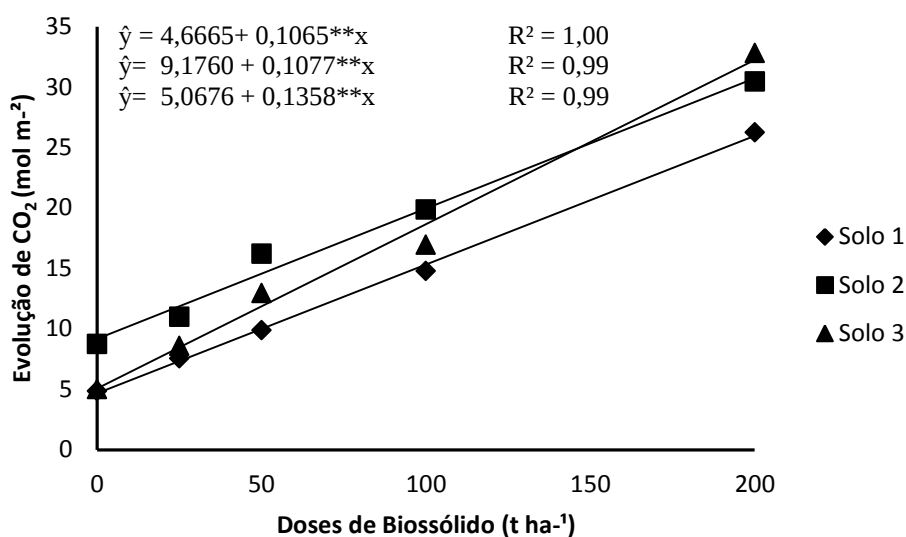


Figura 2. Evolução acumulada do C-CO₂ em solos de área degradada após aplicação de doses crescentes de biossólido em condições de casa de vegetação (solo 1=Latossolo Vermelho Amarelo; solo 2=Latossolo Vermelho e solo 3=Cambissolo Háplico).

O incremento da evolução de C-CO₂, com a aplicação e disposição do biossólidos indica mineralização da matéria orgânica do resíduo, o que para fins de projetos de recuperação de áreas degradadas é muito interessante por criar condições mais favoráveis ao processo de regeneração da cobertura vegetal - importante componente da proteção do solo - e por auxiliar no processo de recuperação da qualidade do solo.

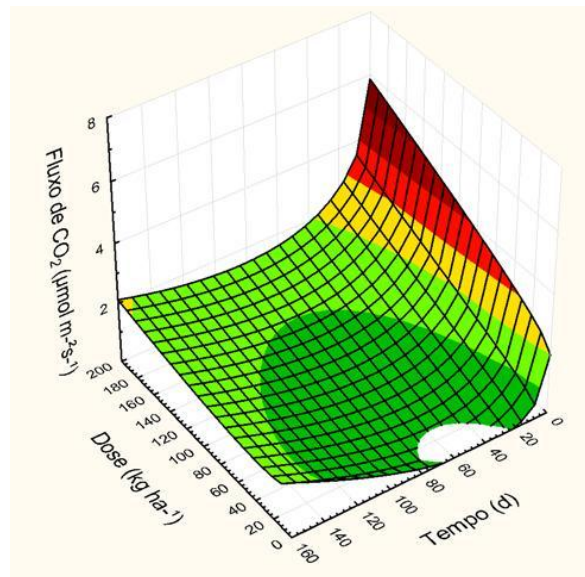
Uma simulação a partir dos dados obtidos, após 5 meses, indica emissão acumulada na maior dose aplicada (200 t ha⁻¹) equivalente a 3115, 3686 e 3867 kg

ha⁻¹ de CO₂ para o Latossolo Vermelho Amarelo, Latossolo Vermelho e Cambissolo Háplico, respectivamente. Para fins de comparação, Teixeira et al. (2011) verificaram emissões de CO₂ equivalentes a 1368, 1834 e 2497 kg ha⁻¹ para os tratamentos sem preparo e sem palha superficial; com preparo com enxada rotativa sem a presença de palha na superfície e; com preparo com enxada rotativa com a presença de palha superficial, respectivamente. Embora os valores de emissão de CO₂, do presente estudo, sejam superiores ao do trabalho comentado, sua ordem de grandeza não é tão superior como poderia se imaginar por se tratar da adição de um material orgânico ao solo, ainda mais se comparado que enquanto neste estudo o período de avaliação foi de cinco meses no trabalho de Teixeira et al. (2011) foi de 15 dias.

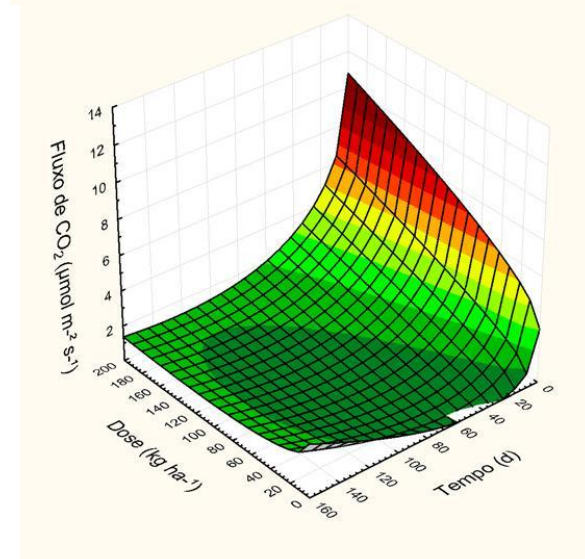
Os dados obtidos permitiram o cálculo da superfície de resposta da emissão de CO₂, em função das doses aplicadas e do tempo (T) decorrido desde a aplicação (Tabela 4). Os ajustes conseguidos nas equações das superfícies (R²), embora não muito elevados, podem ser considerados satisfatórios, tendo em vista a complexidade e número de fatores das variáveis avaliadas. A representação gráfica das superfícies (Figura 3) facilita a percepção da resposta do fluxo às doses aplicadas e ao tempo, sendo comum a todos os três solos: alto fluxo inicial nas maiores doses, seguido de redução acentuada com o passar do tempo, sendo menos pronunciada nas doses maiores, finalizando com fluxos mais semelhantes nas avaliações finais, ainda que com alguma superioridade nas maiores doses. Uma ausência de fluxo é verificada entre os 40 e 60 dias nas doses mais baixas, o que pode ser associado ao efeito da temperatura no ambiente, que neste período atingiu valores mais baixos.

Tabela 4. Equações das superfícies de resposta da emissão de CO₂ em função das doses (D) aplicadas de biossólido e do tempo (T) decorrido desde a aplicação

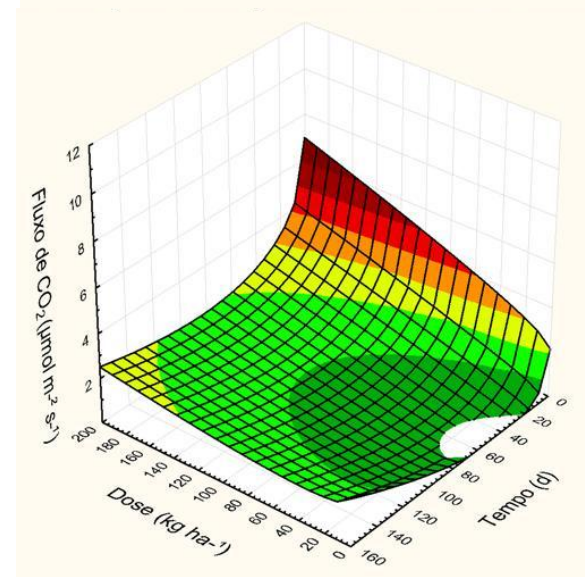
Solo	Fluxo de CO ₂ (μmol m ⁻² s ⁻¹)	R ²
LVA	$1,9904 - 0,6701 ** T^{0.5} + 0,0522 ** T + 0,1040 ** D^{0.5} + 0,012 ** D - 0,02021 ** T^{0.5} D^{0.5}$	0,48
LV	$3,0307 - 0,9934 ** T^{0.5} + 0,0783 ** T + 0,34997 ** D^{0.5} + 0,01398 ** D - 0,05237 ** T^{0.5}$	0,68
CX	$2,156 - 0,7428 ** T^{0.5} + 0,0584 ** T + 0,1326 ** D^{0.5} + 0,0146 ** D - 0,0245 ** T^{0.5} D^{0.5}$	0,56



a



b



c

Figura 3. Superfície de resposta da emissão de CO₂ em função da aplicação das doses de biossólido e do tempo decorrido desde a aplicação: a) Latossolo Vermelho Amarelo, b) Latossolo Vermelho e c) Cambissolo Háplico.

4. Conclusões

1. A aplicação de biossólido incrementou a mineralização da matéria orgânica, como diagnosticada pela maior evolução de C-CO₂, com impactos positivos esperados no processo de recuperação da área degradada.
2. O volume de CO₂ emitido com a aplicação de altas doses de biossólido assemelha-se ao produzido em atividades agrícolas de uso da terra.

5. Referências

- ABDALA, G. C.; CALDAS, L. S.; HARIDASAN, M.; EITEN, G. Above and belowground organic matter and root:shoot ration in a cerrado in Central Brazil. *Brazilian Journal of Ecology*. v. 2, p. 11-23, 1998.
- CIOTTA, M. N.; BAYER, C.; ERNANI, P. R.; FONTOURA, S. M. V.; WOBETO, C. & ALBUQUERQUE, J. A. Manejo da calagem e seu efeito sobre componentes da acidez de um Oxisol sob plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, v.27, p.527-535, 2004.
- COSTA, F. S.; ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; FONTOURA, S. M. V. & WOBETO, C. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas de plantio direto e preparo convencional. *R. Bras. Ci. Solo*, v.27, p.527-535, 2003.
- DOBBIE, K.E.; SMITH, K.A. Nitrous oxide emission factors for agricultural soils in Great Britain: the impact of soil water-filled pore space and other controlling variables. *Global Change Biology*, v.9, p.204-218, 2003.
- HOUGHTON, J. *Global Warming*. Cambridge University Press, 2 ed., 1997. 242p.
- HUNGATE, B. A.; JAEGER III, C. H.; GAMARA, G.; CHAPIN III, F. S.; Field, C.B. Soil microbiota in two annual grasslands: responses to elevated atmospheric CO₂. *Oecologia*, v.124, p.589-598, 2000.
- IPCC. Third assessment report. Working Group I. Intergovernmental Panel on Climate Change. 2001.
- JOBÁGY, E. G.; JACKSON, R. B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications*. v.10, p. 423-436, 2000.
- JONES, T. H.; THOMPSON, L. J.; LAWTON, J. H.; BEZEMER, T. M.; BARDGETT, R. D.; BLACKBURN, T. M.; BRUCE, K. D.; CANNON, P. F.; HALL, G. S.; HARTLEY, S. E.; HOWSON, G.; JONES, C. G.; KAMPICHLER, C.; KANDELER, E.; RITCHIE, D. A. Impacts of rising atmospheric carbon dioxide on Model Terrestrial Ecosystems. *Science*, v. 280, n.5362, p.441-443, 1998.
- MENDONÇA, E. S. & MATOS, E. S. *Matéria orgânica do solo: métodos de análises*. 1. ed. Ponte Nova: D&M Gráfica e Editora Ltda, 2005. 107p.
- POST, W. M.; EMANUEL, W. R.; ZINKE, P. J.; STANGENBERGER, A. G. Soil carbon pools and world life zone. *Nature*, n.298, p.156-159, 1982.

SCHLESINGER, W. H. 1997. Biogeochemistry an analysis of global change. Academic Press, 2 ed. 565 p.

SIQUEIRA NETO, M. Estoque de carbono e nitrogênio do solo com diferentes usos no cerrado em Rio Verde. Piracicaba: USP/CENA. 2006, 162p. (Tese de doutorado).

TEIXEIRA, L. G. ; FUKUDA, A. ; PANOSSO, A. R. ; LOPES, A. ; LA SCALA Jr, N. Soil CO₂ emission as related to incorporation of sugarcane crop residues and aggregate breaking after rotary tiller. Engenharia Agrícola, v.31, p.1075-1084, 2011.

TOWNSEND, C. R.; BEGON, M; HARPER, J. L. 2006. Fundamentos em ecologia. Ed. Artmed, 2 ed. 592 p.

UFV - UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA - SAEG - Sistema para Análises Estatísticas. Versão 9.1. Fundação Arthur Bernardes. Viçosa: UFRV, 2007. Disponível em: <http://www.ufv.br/saeg/> Consultado em 22/06/2011.

WEITZ, A.; LINDER, E.; FROLKING, S.; CRILL, P.; KELLER, M. N₂O emissions from humid tropical agricultural soils: effects of soil moisture, texture and nitrogen availability. Soil Biology and Biochemistry, v.33, p.1077-1093, 2001.

CONCLUSÕES GERAIS

1. A aplicação de biossólidos proporciona incrementos nos teores de C e N do solo, bem como da mineralização da matéria orgânica e consequente evolução de CO₂, não afetando no curto prazo as características físicas do solo.
2. A utilização de biossólidos em projetos de recuperação de áreas degradadas apresenta-se como uma adequada alternativa para recomposição dessas áreas, em especial pelo expressivo efeito positivo sobre a regeneração da cobertura vegetal.

APÊNDICE

Tabela 1 – Análise de variância para as variáveis de física do solo, carbono orgânico e emissão de CO₂ em função das doses de biossólido.

F.V.	G.L	Quadrados Médios (significância)									
		Ds	Dp	Pmicro	Pmacro	Ptotal	ADA	DMP	DMG	CO	Emissão de CO ₂
Rep	3	0.12808*	0.005750	0.026260	0.003820	0.02464*	42.91667°	0.077500	0.173010	66.13608*	0.11880
Trat	4	0.12349*	0.0411**	0.009700	0.001390	0.007690	4.210000	0.098240	0.213350	484.0220**	2.216**
Erro A	12	0.031130	0.006690	0.012710	0.009090	0.005040	12.55000	0.128610	0.236540	14.066870	0.10265
Tempo	4	0.0459°	0.4471**	0.00799*	0.03715*	0.0233**	20.56*	2.1844**	3.1904**	258.5957**	7.032**
Tempo*Trat	16	0.032540	0.005410	0.003580	0.003600	0.003350	9.991250	0.019820	0.033370	5.664310	0.14467
Resíduo	60	0.021150	0.008020	0.003060	0.004940	0.003730	6.798330	0.026710	0.055590	13.389160	0.14298
CVA		15.62	3.26	27.00	70.05	12.96	114.65	16.15	27.69	20.39	15.48
CVB		12.87	3.57	13.25	51.64	11.15	84.38	7.36	13.42	19.90	18.27

**, *, ° significativo a 1, 5 e 10% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

Tabela 2 – Análise de variância para emissão total de CO₂ em função dos tratamentos ao fim de 158 dias.

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Quadrado médio
Repetição	3	4.40
Solo	2	106.49**
Doses	4	1024.60**
Solo x Doses	8	9.02**
Resíduo	42	2.13
Total	59	

**, *,° significativo a 1, 5 e

10% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

Tabela 3. Resumo da análise de variância para teor de N no solo e nas frações da matéria orgânica em função dos tratamentos.

FV	G.L.	Quadrados Médios (significância)							
		NTOT	NNO3	NNH4	NBIO	NMOL	NHUM	NAF	NAH
Bloco	3	0.2739*	207.4	6.968	111.325*	1.3711**	0.22858°	0.02195	0.00559
TRAT	4	4.6438**	17458.1**	82.435**	322.701**	3.3644**	2.88051**	0.45820**	0.30693**
Erro A	12	0.0485	219.8	4.578	25.206	0.1144	0.08732	0.04051	0.02402
TEMPO	4	3.2611**	24741.3**	152.424**	55.016*	3.6184**	2.93441**	0.18303**	0.09848*
TEMPO*TRAT	16	0.3395**	2609.8**	19.337**	4.331	0.0373	0.16107°	0.04802°	0.01264
Resíduo	60	0.1000	361.0	4.603	20.305	0.0960	0.08935	0.03004	0.02798
CVA		19.14	35.12	22.26	50.51	18.28	31.10	45.74	46.97
CVB		27.50	45.01	22.32	45.33	16.75	31.46	39.39	50.69

**, *,° significativo a 1, 5 e 10% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

Tabela 4. Resumo da análise de variância para pH e teor de C no solo e nas frações da matéria orgânica em função dos tratamentos.

FV	G.L.	Quadrados Médios (significância)						
		pH	CORDA	CHUM	CAF	CAH	MOL	CMOL
Bloco	3	0.988*	227.9°	16.37°	1.737	6.042*	1.741	63.99**
TRAT	4	2.742**	10043.5**	105.19**	9.321**	16.861**	17.802**	10.53
Erro A	12	0.182	75.4	5.33	1.179	1.602	1.420	8.86
TEMPO	4	4.138**	20352.7**	428.48**	15.417**	35.458**	25.434**	669.67**
TEMPO*TRAT	16	0.054	1039.8**	14.10*	1.643	1.691	1.335	11.08
Resíduo	60	0.055	34.2	7.12	1.425	1.766	2.183	14.40
CVA		8.27	15.09	19.30	26.61	38.47	32.11	12.50
CVB		4.55	10.16	22.30	29.26	40.39	39.82	15.94

**, *,° significativo a 1, 5 e 10% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

Tabela 5 - Resumo da análise de variância e coeficientes de variação dos dados de fluxo de CO₂ em função das doses crescentes de biossólido ao longo do tempo em três tipos de solo.

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio
Rep	3	0.555
Solo	2	78.126**
Dose	4	338.685**
Solo*Trat	8	3.380**
Erro A	42	0.351
Tempo	29	58.312**
Erro B	87	0.165
Tempo*Solo	58	4.255**
Tempo*Trat	116	16.731**
Tempo*Solo*Trat	232	1.373**
Erro C	1218	0.137
Total	1799	
CVA (%)	42.34	
CVB (%)	29.01	
CVC (%)	26.44	