

Eficiência agronômica de dois resíduos orgânicos na revegetação do horizonte C de um Latossolo Vermelho¹

Agronomic efficiency of two organic residues on the revegetation of a red Oxisol C-horizon

Rodrigo Studart Corrêa^{2*}, Gustavo Macedo de Mello Baptista³, Alexander Paulo do Carmo Balduino⁴
e Lucas de Carvalho Ramos Silva⁵

Resumo - A incorporação de matéria orgânica a substratos é uma maneira de criar condições edáficas para a revegetação de materiais expostos por mineração e obras civis. Este trabalho visou mensurar a eficiência de dois resíduos orgânicos (lodo de esgoto e composto de lixo) em promover o desenvolvimento de uma cobertura vegetal herbácea sobre o horizonte C de um Latossolo Vermelho, que foi exposto à superfície por obras civis. Doses entre 0 e 76 t ha⁻¹ (base seca) desses resíduos foram incorporadas ao substrato de parcelas experimentais e o desenvolvimento da cobertura vegetal sobre elas foi acompanhado. Os resultados indicaram que o lodo de esgoto foi entre 1,8 e 6,2 vezes mais eficiente que o composto de lixo em desenvolver cobertura vegetal sobre a superfície exposta, como consequência da maior capacidade de o lodo aumentar a CTC do substrato e de fornecer N, P, K, Ca e Zn para as plantas.

Palavras-chave - Recuperação de terras. Reabilitação de solos. Lodo de esgoto. Composto de lixo.

Abstract - Land incorporation of organic matter is a way to create edafic conditions to establish plants on spoils exposed by mining and building activities. This work aimed to measure the efficiency of two municipal organic residues (domestic sewage sludge and composted solid waste) to develop a grassy cover on a red Oxisol C-horizon exposed to surface by construction works. Application rates from 0 to 76 t ha⁻¹ (dry solids) of these residues were plowed into the spoils of experimental blocks and the grassy cover development on them was monitored. Results indicated that sewage sludge was from 1.8 to 6.2 times more efficient than composted municipal solid waste to develop vegetative cover on the plots' surface, since sewage sludge had a superior performance to raise spoil's CEC and to supply N, P, K, Ca, and Zn to plants.

Key words - Land reclamation. Soil rehabilitation. Sewage sludge. Composted solid waste.

* Autor para correspondência

¹ Recebido para publicação em 01/01/2008; aprovado em 09/10/2008

² Eng. Agrônomo, Ph. D., Prof. Adjunto do Depto. de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília. Caixa Postal: 04.401, CEP: 70.910-900, Brasília-DF, rodmanga@yahoo.com.br

³ Geógrafo, D. Sc., Prof. Adjunto do Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Católica de Brasília, gmbaptista@pos.ucb.br

⁴ Engenheiro Florestal, M. Sc., Técnico da Companhia de Saneamento do Distrito Federal, alexandergaleria@yahoo.com.br

⁵ Engenheiro Florestal, M. Sc., Doutorando pela Universidade de Guelph – Canadá, lucascsilva@gmail.com

Introdução

Aterros e escavações expõem à superfície material de composição variada, que é genericamente denominado substrato (GOERDET; CORRÊA, 2004). Como regra, substratos de obras civis e mineração são compostos pelos horizontes subsuperficiais do solo. Esses materiais são inapropriados ao estabelecimento de plantas, pois neles predominam os minerais primários das rochas, a superfície exposta é compactada, com baixa capacidade de armazenar água, baixa capacidade de troca catiônica (CTC), baixa concentração de nutrientes e de matéria orgânica e são estéreis de vida (RODRIGUES et al. 2007). Sob essas condições de substrato, a sucessão ecológica leva séculos para repor por meios naturais uma comunidade clímax no local (BEGON et al., 2006). Por esse motivo, o estabelecimento de uma cobertura vegetal para controle da erosão e para acelerar a sucessão, entre outros, é a medida de recuperação mais adotada em áreas com o substrato exposto pela mineração e obras civis (BEZERRA et al., 2006).

Nesse contexto, a pista de pouso e decolagem 11R/29L do Aeroporto Internacional de Brasília Juscelino Kubitschek foi construída com a retirada de material (corte) da cabeceira 11R (oeste) para a construção de um aterro de até 12 m de altura na cabeceira 29 L (leste). Após a pavimentação da faixa de rolamento, aproximadamente 180 ha no entorno da camada asfáltica permaneceram com o horizonte C de um Latossolo Vermelho (EMBRAPA, 1999) exposto à superfície. Essa área, que serve de local de escape das cabeceiras e faixa de domínio da pista, deve ser revegetada com espécie herbácea, visando ao controle de erosão no local e à segurança das aeronaves (SDEP, sem data).

Baixo teor de matéria orgânica tem sido considerado o principal problema edáfico para a revegetação de áreas que perderam os horizontes superficiais do solo (ADANI et al., 2007). As técnicas de reabilitação de áreas escavadas são variadas (VALCARCEL et al., 2007), e a incorporação de altas doses de matéria orgânica aos substratos expostos tem sido uma delas. Essa medida visa à criação de um ambiente edáfico apropriado aos vegetais, pois a matéria orgânica melhora as características físicas do substrato, eleva a sua fertilidade, cria condições biológicas favoráveis às plantas e aos organismos de solo e facilita o restabelecimento de ciclos biogeoquímicos no local (BROWN; LEONARD, 2004; ADANI et al., 2007; (RODRIGUES et al. 2007).

Por motivos econômicos e para incentivar a reciclagem, resíduos urbanos, tais como lodo de esgoto e lixo compostado, têm sido utilizados como fontes de matéria orgânica em trabalhos de revegetação de horizontes subsuperficiais expostos à superfície (BEZERRA et al., 2006). Os maiores apelos para o uso agrônomico

de resíduos orgânicos residem no aproveitando de seus potenciais fertilizante e condicionador de solos (GUEDES et al., 2006; ADANI et al., 2007), sobretudo em regiões tropicais, onde a maior parte da CTC dos solos (70 - 80%) depende da matéria orgânica (BRADY; WEIL, 2002). Incremento de CTC e da concentração de matéria orgânica e nutrientes são efeitos constantes em solos e substratos tratados com resíduos orgânicos (ADANI et al., 2007; BERTONCINI et al., 2008).

Dessa forma, este trabalho visou mensurar a eficiência agrônômica de o lodo de esgoto e o lixo compostado desenvolverem uma cobertura vegetal herbácea sobre o horizonte C de um Latossolo Vermelho que foi exposto à superfície.

Material e métodos

Para se avaliarem as eficiências agrônômicas do lodo de esgoto e do composto de lixo produzidos no Distrito Federal - DF, 27 parcelas de 36 m² cada uma (6 x 6 m) foram delimitadas sobre o substrato exposto, ao lado da cabeceira 11R da pista do Aeroporto JK de Brasília, coordenadas 15° 52' 51,13" S e 47° 56' 32,65" W. O clima predominante da região é o Tropical de Savana - Aw, segundo a classificação de Köppen. A precipitação anual varia de 1.200 mm a 1.600 mm, com 84% do volume sendo precipitado no verão. A temperatura média anual oscila entre 18 °C e 22 °C e a umidade relativa do ar varia de 12% a 85%. O local apresentava Latossolo Vermelho como solo original (EMBRAPA, 1999). O substrato exposto à superfície possuía 499 g kg⁻¹ (± 54) de argila, 176 g kg⁻¹ (± 13) de silte e 325 g kg⁻¹ (± 58) de areia.

As parcelas experimentais foram sorteadas e receberam, em três repetições, doses equivalentes a 19 t ha⁻¹ (dose 1 - D₁), 38 t ha⁻¹ (dose 2 - D₂), 57 t ha⁻¹ (dose 3 - D₃) e 76 t ha⁻¹ (dose - D₄), base seca, de lodo de esgoto ou composto de lixo. Uma faixa livre de 0,5 m foi preservada entre as 27 parcelas experimentais. Os nove tratamentos (4 doses de lodo, 4 doses de composto + 1 testemunha) constituíram um arranjo fatorial (2 resíduos x 4 doses x 3 repetições + 3 parcelas-controle = 27 parcelas), com vistas à análise de dados quantitativos por meio de regressões.

As duas fontes de matéria orgânica foram manualmente espalhadas sobre a superfície de cada parcela e incorporadas com uma grade leve, até 20 cm de profundidade, no início da estação chuvosa. Duas semanas após a incorporação, as parcelas foram semeadas com *Paspalum notatum* var. *saurae* Parodi (capim pensacola) a uma densidade de 100 kg ha⁻¹. Três das 27 parcelas foram semeadas sem receber quaisquer fontes de matéria orgânica, para efeito de controle.

O lodo de esgoto foi obtido na Estação de Tratamento de Esgoto Brasília Sul, operada pela Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal - Caesb. Tratava-se de uma mistura de lodo originado pelos tratamentos primário, secundário (lodo biologicamente ativado) e terciário [polido com $Al_2(SO_4)_3$].

A mistura composta pelos três tipos de lodo foi desaguada em prensa mecânica e centrífuga e o resíduo foi liberado para o pátio de estocagem, contendo entre 86 dag kg^{-1} e 88 dag kg^{-1} de umidade. Ao deixar o pátio de estocagem, o lodo apresentava $52,5 \text{ dag kg}^{-1}$ de água (Tabela 1). O composto de lixo foi produzido em leiras de aeração passiva, por sessenta dias, na Usina e Compostagem de Ceilândia - DF, a partir do lixo orgânico doméstico coletado em Brasília e Cidades Satélites (Tabela 1). Amostras compostas de substrato (três sub-amostras/parcela) foram coletadas para análises laboratoriais na data de emergência das plântulas.

Tabela 1 - Parâmetros analisados nas fontes de matéria orgânica utilizadas no substrato das parcelas experimentais estabelecidas ao lado da cabeceira 11R do Aeroporto JK de Brasília (média \pm desvio padrão)

Parâmetro	Composto de lixo ⁽¹⁾	Lodo de esgoto ⁽¹⁾
Umidade(dag kg ⁻¹)	41,3 \pm 2,9	52,5 \pm 1,3
Matéria orgânica (g kg ⁻¹)	439 \pm 2,1	515 \pm 1,2
Relação C/N	35,9 \pm 3,1	5,6 \pm 1,8
Nitrogênio total (g kg ⁻¹)	7,1 \pm 0,8	53,5 \pm 2,7
Fósforo total (g kg ⁻¹)	0,62 \pm 0,02	17,5 \pm 0,8
Potássio (g kg ⁻¹)	0,7 \pm < 0,01	1,8 \pm < 0,01
Cálcio (g kg ⁻¹)	82,2 \pm 6,2	26,8 \pm 1,4
Magnésio (g kg ⁻¹)	0,9 \pm	4,1 \pm
Enxofre (g kg ⁻¹)	1,5 \pm 0,3	6,2 \pm 0,9

A textura do substrato foi determinada pelo Método do Densímetro (Bouyoucos) e o carbono orgânico, para cálculo da matéria orgânica (M.O.), pelo método da combustão úmida (Walkley-Black) e posterior titulação com uma solução 0,05 M de sulfato ferroso amoniacal. Os resultados de carbono orgânico foram multiplicados por 1,724 para se estimar a concentração de M.O. Nitrogênio amoniacal (N-NH₄⁺) foi avaliado pelo método Kjeldahl de destilação. O pH foi medido com potenciômetro em uma solução 1:2,5 de solo-água. Fósforo disponível (P-disponível), potássio trocável (K-trocável) e zinco (Zn⁺²) foram extraídos com solução Mehlich I (0,025 N H₂SO₄ + 0,05 N HCl). As concentrações de P-disponível foram determinadas em fotocolorímetro a 660 nm e as

concentrações de K-trocável e Zn⁺², em espectrofotômetro de absorção atômica com chama. Alumínio (Al⁺³), cálcio (Ca⁺²) e magnésio (Mg⁺²) foram extraídos com uma solução de KCl 1 N. A concentração de Al⁺³ foi determinada por titulação com NaOH (0,01 N) e as concentrações de Ca⁺² e Mg⁺² foram obtidas em espectrofotômetro de absorção atômica com chama. Acidez potencial (H⁺ + Al⁺³) foi determinada por meio de uma solução tamponada de acetato de cálcio 0,5 M e posterior titulação com NaOH 0,05 M.

A partir dos resultados obtidos, foram calculadas a capacidade de troca catiônica (CTC a pH 7), a soma de bases (S) e a porcentagem de saturação por bases (V%) dos substratos (Tabela 2). Nitrogênio total nas fontes de matéria orgânica foi analisado pelo método Kjeldahl de destilação. As duas fontes de matéria orgânica foram digeridas a 200 °C em uma mistura de ácido nítrico (HNO₃), fluorídrico (HF) e perclórico (HClO₄) concentrados para a determinação das concentrações dos demais nutrientes, utilizando-se os mesmos métodos citados acima, todos descritos em Embrapa (1997).

As parcelas foram visitadas diariamente até a germinação das sementes e o estabelecimento das plantas foi acompanhado até a nona semana após a emergência das plântulas. O registro do desenvolvimento da cobertura vegetal em cada parcela foi realizado por meio de uma câmara digital portátil - Sony Cyber-shot, 4.1 mega *pixels*. As imagens foram obtidas a 2 m de altura da superfície, no centro de cada parcela, cobrindo uma área de 2 x 2 m, nas semanas 0; 3; 5; 7 e 9 da data de emergência do capim pensacola. As 135 imagens digitais obtidas (27 parcelas x 5 datas) foram processadas no *software* ENVI 4.2, para se estimar o percentual de cobertura vegetal nas parcelas que receberam lodo de esgoto e composto de lixo durante o período de avaliação.

Os resultados de cobertura vegetal foram inseridos no eixo das ordenadas de um gráfico, tendo o tempo decorrido em semanas inserido no eixo das abscissas. A eficiência agronômica de um insumo pode ser definida como a função resposta de produção vegetal à unidade de aplicação do insumo em questão (BOLLAND, 1997). Dessa forma, a função resposta de cada tratamento foi ajustada pelo Método Modificado de Maximização de Probabilidades de Newton (equação 1), utilizando-se o programa GenStat® para Windows 9ª edição:

Equação 1:

$$Y = A - BR^X \quad \text{em que R é positivo e } < 1 \quad (1)$$

A variável Y é a estimativa de cobertura vegetal em porcentagem (%), X é o tempo decorrido em semanas, R é a inclinação da reta, A é a cobertura vegetal máxima

Tabela 2 - Parâmetros analisados em Latossolo Vermelho sob Cerrado e no substrato das parcelas experimentais (média \pm desvio padrão)

Material/ Parâmetro	M.O. ⁽¹⁾	pH	CTC	V	N-NH ₄ ⁺	P-disp.	K-troc.	Zn ⁺²
	g kg ⁻¹	água	cmol _c dm ⁻³	%	mg dm ⁻³			
Solo sob Cerrado (horizonte A)	18,2 \pm 0,6	5,1 \pm 0,8	7,1 \pm 0,3	5,1 \pm 0,6	12,9 \pm 1,3	2,1 \pm 0,01	27,4 \pm 1,2	0,05 \pm < 0,01
Substrato exposto (horizonte C)	4,8 \pm 0,1	5,4 \pm 0,6	3,2 \pm 0,1	3,5 \pm 0,2	0,13 \pm < 0,01	0,1 \pm < 0,01	23,5 \pm 1,6	0,13 \pm < 0,01
Substrato + Lixo D ₁	16,9 \pm 1,3	6,8 \pm 0,4	4,4 \pm 0,1	100 \pm 5,5	18,2 \pm 0,9	5,6 \pm 0,8	144,4 \pm 6,9	5,9 \pm 0,02
Substrato + Lixo D ₂	21,9 \pm 0,8	6,9 \pm 0,1	5,9 \pm 0,3	100 \pm 6,3	30,9 \pm 1,1	9,3 \pm 1,1	174,5 \pm 9,1	8,6 \pm 0,05
Substrato + Lixo D ₃	20,6 \pm 0,9	7,3 \pm 0,3	6,9 \pm 0,6	100 \pm 3,6	54,3 \pm 3,2	10,8 \pm 0,9	234,7 \pm 11,1	8,6 \pm 0,07
Substrato + Lixo D ₄	27,7 \pm 1,9	7,4 \pm 0,6	7,3 \pm 0,4	100 \pm 5,1	73,1 \pm 3,5	15,1 \pm 0,9	254,7 \pm 13,1	6,0 \pm 0,02
Substrato + Lodo D ₁	10,8 \pm 0,5	6,4 \pm 0,2	6,6 \pm 0,2	85,4 \pm 3,9	69,9 \pm 1,8	32,4 \pm 2,3	124,4 \pm 10,5	20,0 \pm 0,7
Substrato + Lodo D ₂	18,6 \pm 0,7	6,5 \pm 0,3	8,2 \pm 0,5	85,3 \pm 2,8	148,7 \pm 6,1	41,6 \pm 2,5	114,3 \pm 9,8	25,1 \pm 1,2
Substrato + Lodo D ₃	16,9 \pm 0,4	5,6 \pm 0,4	11,8 \pm 1,1	67,9 \pm 4,2	237,1 \pm 7,4	118,6 \pm 6,7	184,5 \pm 8,8	30,2 \pm 1,8
Substrato + Lodo D ₄	28,0 \pm 1,7	4,8 \pm 0,5	16,2 \pm 0,9	61,6 \pm 2,8	375,4 \pm 8,1	353,7 \pm 7,3	224,6 \pm 13,3	42,4 \pm 2,0

⁽¹⁾M.O.: Matéria orgânica

proporcionada pelo tratamento e B é a resposta de cobertura vegetal ao tempo decorrido. Um fator de curvatura (C) foi derivado de $-\ln R$ para o cálculo da eficiência de cada tratamento (diferentes doses de lodo ou composto de lixo incorporados ao substrato), tendo a cobertura vegetal como resposta a cada tratamento. Sendo assim, a eficiência agrônômica de cada produto sob diferentes doses de aplicação foi calculada pelo produto entre B e C (BC), conforme descrito em Corrêa et al. (2005).

A razão entre os valores de BC dos diferentes insumos e doses de aplicação (B_1C_1/B_2C_2) dá a eficiência relativa (ER) de cada insumo/dose em relação a outro insumo/dose (CORRÊA et al., 2005). Quando $ER = 1$, os tratamentos comparados são de igual eficiência; quando $ER < 1$ ou $ER > 1$, um dado tratamento é menos ou mais eficiente que o tratamento referência. Valores de desvio padrão para B e R ($\hat{\delta}_B$ e $\hat{\delta}_R$, respectivamente) foram estimados pelo programa GenStat®. O desvio padrão de BC ($\hat{\delta}_{BC}$) foi calculado de acordo com Beers (1957 *apud* CORRÊA et al.; 2005). Os valores de BC entre

os tratamentos foram comparados por meio do teste de Tukey.

Quando a resposta (cobertura vegetal) não preencheu o modelo assintótico descrito pela equação 1, equações lineares de regressão ($\hat{Y} = a + bX$) foram utilizadas para a comparação da eficiência dos tratamentos, conforme Barbarick e Ippolito (2000) e Corrêa et al. (2005). As significâncias do coeficiente angular (b_i) e de determinação (R^2) dos modelos lineares foram avaliadas por meio do Teste t, conforme descrito em Snedecor e Cochran (1989). Os coeficientes angulares (b_i) das regressões lineares, descritas para as respostas aos diferentes tratamentos, foram comparadas por meio do teste F (SNEDECOR; COCHRAN, 1989). Quando o teste F indicou a existência de diferença significativa entre os coeficientes angulares de duas regressões, a razão entre eles foi utilizada para determinar a eficiência relativa (ER) de um tratamento em relação ao outro, de acordo com a equação 2 abaixo, descrita em Barbarick e Ippolito (2000) e Corrêa et al. (2005):

Equação 2:

$$ER = \frac{b_1}{b_2} \quad (2)$$

Resultados e discussão

As sementes do capim pensacola germinaram três semanas após serem incorporadas ao substrato, em todas as 27 parcelas experimentais. A emergência das plântulas proporcionou entre 1,1% e 12,9% de imediata cobertura vegetal à superfície exposta. As plântulas nas três parcelas-controle não se desenvolveram nas semanas seguintes e os dados foram descartados. Nas demais 24 parcelas (2 resíduos x 4 doses x 3 repetições), o desenvolvimento do capim pesancola variou de acordo com a fonte de matéria orgânica e a dose de aplicação (Figura 1).

A cobertura vegetal de todas as parcelas tratadas com lodo de esgoto atingiu a parte assintótica da curva entre a terceira e quinta semanas de crescimento. A comparação dos valores de BC dos tratamentos que preencheram o modelo assintótico indicou que não houve diferença significativa de eficiência agrônômica entre as três primeiras doses de lodo de esgoto utilizadas neste trabalho - Lodo D₁, D₂ e D₃ (Tabela 3). As parcelas que receberam a maior dose de lodo, 76 t ha⁻¹ (Lodo D₄), atingiram 96,6% de cobertura vegetal até a nona semana de avaliação, contra valores entre 68,2% e 76,4% nos tratamentos Lodo D₁ a D₃ (Tabela 3). Barrow e Bolland (1990) atribuem respostas desse tipo às diferentes quantidades de nutrientes liberadas pelas variadas doses de um mesmo insumo incorporado ao solo. A maior dose de lodo de esgoto (76 t ha⁻¹) proporcionou também um incremento de 39% na eficiência de esse

resíduo desenvolver a cobertura vegetal sobre o substrato exposto, quando comparada às doses de 19 t ha⁻¹ a 57 t ha⁻¹ (Lodo D₁ a D₃).

As parcelas tratadas com composto de lixo permaneceram na parte linear das curvas até o final da avaliação (Figura 1). As parcelas que receberam a maior dose de lixo compostado (76 t ha⁻¹ - Lixo D₄) atingiram valores de cobertura vegetal semelhantes aos mensurados nas parcelas que receberam as três menores doses de lodo de esgoto (19 t ha⁻¹ - 57 t ha⁻¹ - Lodo D₁ a D₃). Porém, foram necessárias nove semanas para que o tratamento Lixo D₄ atingisse 67% de cobertura vegetal, enquanto que as parcelas sob os tratamentos Lodo D₁, D₂ e D₃ apresentavam entre 68% e 75% de cobertura vegetal na quinta semana após a germinação das sementes (Figura 1). A alta relação C/N do composto de lixo (Tabela 1) pode ter atrasado a sua mineralização e conseqüente liberação de nutrientes. Vários são os conceitos de eficiência agrônômica e o desenvolvimento de coberturas vegetais semelhantes em prazos diferentes é um deles (BOLLAND, 1997).

Os tratamentos que utilizaram composto de lixo responderam linearmente ao tempo decorrido (Figura 1) e a comparação numérica entre os dois resíduos (lodo e lixo) demanda equações de mesma ordem (BARBARICK; IPPOLITO, 2000; CORRÊA et al., 2005). Dessa forma, equações de primeira ordem foram ajustadas para a parte linear das curvas de resposta à aplicação de lodo de esgoto (Figura 1). Quando o teste F indicou a existência de diferença significativa entre os dois resíduos aplicados a mesma dose (19 t ha⁻¹, 38 t ha⁻¹, 57 t ha⁻¹ e 76 t ha⁻¹), a eficiência relativa (ER) do lodo de esgoto em relação ao composto de lixo foi calculada por meio da comparação dos coeficientes angulares ($b_{\text{lodo}}/b_{\text{lixo}}$) para cada dose utilizada (SNEDECOR; COCHRAN, 1989). Os resultados indicaram que o lodo de esgoto foi entre 1,8 e 6,2 vezes mais eficiente para desenvolver a cobertura vegetal do substrato que o composto de lixo (Tabela 4).

O aumento da dose de composto de lixo reduziu a diferença de sua eficiência em relação ao lodo de esgoto para até 1,8 vezes (Tabela 4). De acordo com Brady e Weil (2002), a resposta de uma planta aumenta proporcionalmente ao aumento da aplicação de um insumo até um certo nível, a partir do qual não há mais incremento de produção com o aumento da quantidade de insumo aplicado (Lei dos Rendimentos Decrescentes). Portanto, a maior dose de composto de lixo (D₄ - 76 t ha⁻¹) deve ter fornecido nutrientes em concentrações que se aproximaram da produção máxima possível da espécie utilizada neste trabalho. O mesmo procedimento de comparação de coeficientes angulares (b_i) pelo teste F indicou que não existem diferenças significativas na eficiência agrônômica entre os tratamentos Lixo D₁, D₂ e D₃ (Tabela 4). Apenas o tratamento Lixo D₄ (76 t ha⁻¹) foi quase três vezes mais

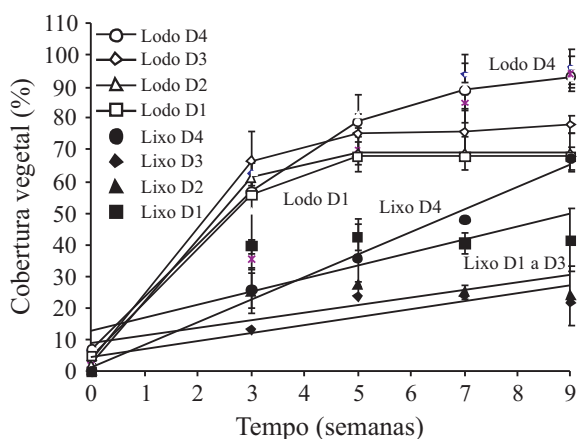


Figura 1 - Respostas da cobertura vegetal (%) à aplicação de diferentes doses de lodo de esgoto ou composto de lixo durante nove semanas de desenvolvimento

Tabela 3 - Coeficientes das respostas de cobertura vegetal ajustados ao modelo assintótico de regressão (coeficiente \pm desvio padrão)

Tratamento	Variável A	Variável B	Fator R	Fator C	BC ⁽¹⁾	ER
	cobertura máxima	resposta ao tratamento	inclinação	curvatura	eficiência	eficiência relativa
Lodo D1 (19 t ha ⁻¹)	68,2	64,3 \pm 3,2	0,55 \pm 0,03	0,60	38,6a	1,0
Lodo D2 (38 t ha ⁻¹)	69,3	59,3 \pm 2,4	0,51 \pm 0,02	0,67	39,7a	1,03
Lodo D3 (57 t ha ⁻¹)	76,4	63,7 \pm 4,7	0,54 \pm 0,02	0,62	39,5a	1,02
Lodo D4 (76 t ha ⁻¹)	96,6	134,4 \pm 7,3	0,67 \pm 0,01	0,40	53,8b	1,39

⁽¹⁾Valores com mesma letra não diferem pelo teste de Tukey ($P < 0,05$)

Tabela 4 - Coeficientes das respostas de cobertura vegetal ajustados ao modelo linear de regressão

Dose/resíduo	Composto de lixo		Lodo de esgoto		Eficiência relativa ER
	Equação	R ²	Equação	R ²	
D ₁ - (19 t ha ⁻¹)	$\hat{Y} = 7,9 + 2,13X^*$ $b_i = 2,13a^{(1)}$	0,62†	$\hat{Y} = 15,4 + 13,1X^{**}$ $b_i = 13,1b^{(1)}$	0,90	6,2
D ₂ - (38 t ha ⁻¹)	$\hat{Y} = 9,05 + 2,36X^*$ $b_i = 2,36a^{(1)}$	0,52†	$\hat{Y} = 1,9 + 12,3X^{**}$ $b_i = 12,3b^{(1)}$	0,99**	5,2
D ₃ - (57 t ha ⁻¹)	$\hat{Y} = 4,18 + 2,56X^*$ $b_i = 2,56a^{(1)}$	0,77*	$\hat{Y} = 8,2 + 12,8X^{**}$ $b_i = 12,8b^{(1)}$	0,96**	5,0
D ₄ - (76 t ha ⁻¹)	$\hat{Y} = 1,05 + 7,17X^{**}$ $b_i = 7,17c^{(1)}$	0,99**	$\hat{Y} = 15,5 + 13,1X^{**}$ $b_i = 13,1b^{(1)}$	0,90*	1,8

† $P < 0,10$; * $P < 0,05$; ** $P < 0,01$. ⁽¹⁾Valores de b_i com mesma letra não diferem pelo teste F ($P < 0,05$)

eficiente em desenvolver a cobertura vegetal sobre o substrato das parcelas que as demais doses de composto de lixo - D₁, D₂ e D₃ (19 t ha⁻¹, 38 t ha⁻¹ e 57 t ha⁻¹).

Trabalhos comparativos entre a eficiência agrônômica de lodo de esgoto e composto de lixo têm relatado a superioridade do primeiro em relação ao segundo resíduo. Maior poder de fornecimento de nutrientes pelo lodo de esgoto é considerado o motivo de sua maior eficiência agrônômica em relação ao lixo compostado (BOVI et al., 2007; CORRÊA; MÉLO FILHO, 2004). Nesse sentido, grau de estabilização da matéria orgânica e sua taxa de mineralização em solos influenciam a liberação de nutrientes e, conseqüentemente, determinam a eficiência agrônômica de um resíduo (CORRÊA et al., 2005).

Lodo de esgoto e composto de lixo foram aplicados ao substrato das parcelas experimentais em doses equivalentes de matéria seca (19 t ha⁻¹, 38 t ha⁻¹, 57 t ha⁻¹ e 76 t ha⁻¹), mas as duas fontes de matéria orgânica apresentam características distintas quanto ao incremento da CTC e das concentrações de N-NH₄⁺, P-disponível e K-trocável, Zn⁺² e Ca⁺² no substrato (Tabela 2). Conseqüentemente, as respostas de cobertura vegetal à aplicação dos resíduos foram distintas (Figura 1). A cobertura vegetal máxima em cada parcela

aumentou linearmente de acordo com o incremento da CTC nos substratos tratados com lodo de esgoto ($\hat{Y}_{CTC} = 2,9 + 6,7X^*$; $R^2 = 0,70^*$). O composto de lixo não acrescentou significativamente CTC ao substrato (b_i não significante a $P = 0,10$) e, portanto, não houve resposta da cobertura vegetal máxima a essa variável (Figura 2).

A cobertura vegetal sobre as parcelas tratadas com lodo de esgoto respondeu de forma logarítmica às concentrações de N-NH₄⁺ ($\hat{Y}_{N-lodo} = 24,1 + 20,4 \ln X^*$; $R^2 = 0,98^{**}$) e P-disponível ($\hat{Y}_{P-lodo} = 5,2 + 16,9 \ln X^{**}$; $R^2 = 0,97^{**}$) no substrato (Figura 3). As inflexões das curvas de N e P na Figura 3 mostram que a aplicação de 19 t ha⁻¹ (D₁) de lodo de esgoto (base seca) foi suficiente para suprir as necessidades do capim pensacola por esses nutrientes. Vários trabalhos relatam aumentos de CTC e das concentrações de N-mineral, P-disponível e outros nutrientes em solos tratados com lodo de esgoto (SIMONETE et al., 2003; CORRÊA et al., 2005; GUEDES et al., 2006; BERTONCINI et al., 2008).

Nas parcelas tratadas com composto de lixo, as respostas das plantas às concentrações de N-NH₄⁺ no substrato ($\hat{Y}_{N-lixo} = 6,3 + 0,44X^*$; $R^2 = 0,76^*$) mantiveram-se linear até a maior dose de aplicação - 76 t ha⁻¹ (Figura 3). Isso

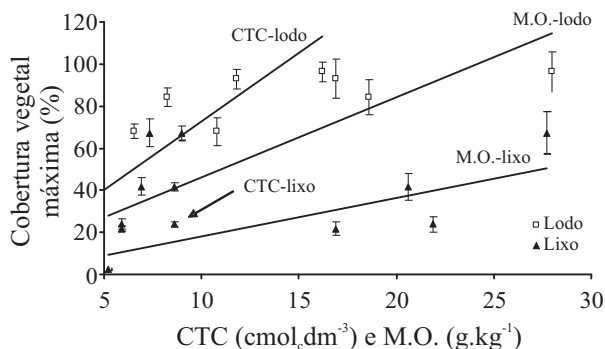


Figura 2 - Respostas da cobertura vegetal máxima (%) à CTC e às concentrações de matéria orgânica nos substratos tratados com lodo de esgoto ou composto de lixo

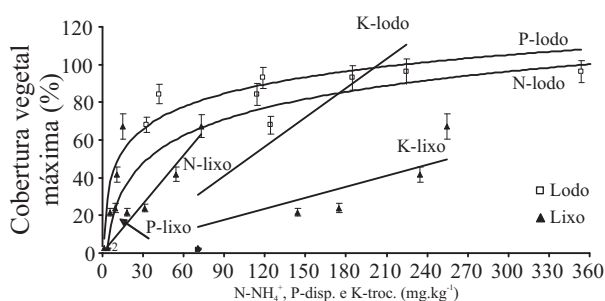


Figura 3 - Respostas da cobertura vegetal máxima (%) às concentrações de $N-NH_4^+$, P-disponível e K-trocável nos substratos tratados com lodo de esgoto ou composto de lixo

demonstra que a espécie utilizada responderia a maiores doses de $N-NH_4^+$ aplicado por meio do composto de lixo até que uma assintótica fosse atingida. As doses crescentes de lixo compostado não incrementaram significativamente o P-disponível nos substratos adubados com esse resíduo (Tabela 2) e, portanto, a camada vegetal nas parcelas não respondeu a esse nutriente aplicado via composto de lixo (Figura 3).

A cobertura vegetal sobre as parcelas tratadas com lodo de esgoto também respondeu de forma logarítmica às concentrações Zn^{+2} aplicadas por meio desse resíduo ($\hat{Y}_{Zn} = 25,9 \ln X^* - 1,0$; $R^2 = 0,98^{**}$). Similar às respostas de $N-NH_4^+$ e P-disponível (Figura 3), a inflexão da curva de Zn^{+2} , conforme a equação acima, mostra que a aplicação de 19 t ha^{-1} de lodo de esgoto (Lodo D₁) também foi suficiente para suprir a demanda do capim pensacola por esse micronutriente.

O composto de lixo não foi capaz de aumentar de maneira consistente a concentração desse micronutriente no substrato. Walker et al., (2008) não detectaram aumentos significativos nas concentrações de Zn^{+2} e outros nutrientes em um solo tratado com 30 t ha^{-1} de lixo compostado. O baixo poder fertilizante de lixo compostado é também

discutido nos trabalhos de Corrêa e Mélo Filho (2004) e Bovi et al. (2007).

Os dois resíduos utilizados aumentaram linearmente e de modo semelhante os teores de K-trocável no substrato de $23,5 \text{ mg kg}^{-1}$ para até $224,6 - 254,7 \text{ mg kg}^{-1}$ (Tabela 2). Apesar disso, a cobertura vegetal máxima das parcelas respondeu de maneira diferente aos teores de K-trocável fornecido pelo lodo de esgoto e pelo composto de lixo (Figura 3). A comparação dos coeficientes angulares das retas (b_i) mostra que a resposta das plantas ao potássio fornecido pelo lodo de esgoto ($\hat{Y}_{K\text{-lodo}} = 12,8 + 0,55X^*$; $R^2 = 0,77^*$) foi mais intensa do que ao potássio fornecido pelo composto de lixo ($\hat{Y}_{K\text{-lixo}} = 13,7 + 0,20X^*$; $R^2 = 0,74^*$).

As respostas lineares ao K-trocável indicam que o lodo de esgoto e o lixo compostado foram fontes modestas desse nutriente (BERTONCINI et al., 2008) em relação ao $N-NH_4^+$, P-disponível e Zn^{+2} e Ca^{+2} do lodo de esgoto, que provocaram respostas logarítmicas da cobertura vegetal ($\hat{Y}_{Ca\text{-lodo}} = 5,2 + 16,9 \ln X^{**}$; $R^2 = 0,97^{**}$). Dessa forma, o aumento das concentrações de K-trocável por meio da incorporação de lodo de esgoto no substrato, e de outros nutrientes, tais como o Mg^{+2} (Tabela 2), requer elevadas doses, que podem resultar em excesso de nitrogênio, fósforo e zinco no sistema solo-planta (BARBARICK; IPPOLITO, 2000). Lodos de esgotos são geralmente aplicados com base na dose agrônômica de nitrogênio (CORRÊA et al., 2005). Outros nutrientes presentes em menores concentrações nesse resíduo podem limitar o desenvolvimento da planta, especialmente potássio (CRUSH et al., 2006). Por isso, Guedes et al. (2006) se anteciparam a possíveis deficiências de potássio ao cultivarem eucalipto com lodo de esgoto e aplicaram KCl como fertilização complementar.

As doses crescentes de matéria orgânica incorporadas ao substrato não explicaram sozinhas a eficiência (BC e b_i) de os dois resíduos promoveram o desenvolvimento da cobertura vegetal sobre as parcelas ($R^2 = 0,37$, $P > 0,10$). Os dois resíduos foram incorporados às parcelas experimentais em doses equivalentes de matéria seca, mas os efeitos de cada um deles sobre a CTC e concentrações de $N-NH_4^+$, P-disponível, Zn^{+2} e Ca^{+2} dos substratos foram distintos (Tabela 2). Entre os doze parâmetros analisados neste trabalho [pH, matéria orgânica, $N-NH_4^+$, CTC a pH 7, S, V, ($H^+ + Al^{+3}$), P-disponível, K-trocável, Ca^{+2} , Mg^{+2} e Zn^{+2}], cinco deles combinados - CTC, $N-NH_4^+$, P-disponível, K-trocável e Zn^{+2} - explicaram 99% da eficiência agrônômica dos resíduos utilizados neste trabalho (Eficiência = $1,20 \text{ CTC} + 2,37 \text{ P-disponível} + 0,20 \text{ Zn} - 0,12 \text{ NH}_4^+ - 0,12 \text{ K-trocável} + 0,04$; $R^2 = 0,99$; $P < 0,017$). A maior contribuição para o modelo acima, obtido por meio de uma regressão *stepwise*, foi da CTC, seguida do Zn^{+2} e do K-trocável.

Porém, os diferentes nutrientes do lodo de esgoto analisados neste trabalho (N-NH₄⁺, P-disponível, K-trocável, Ca⁺², Mg⁺² e Zn⁺²) foram liberados no substrato em concentrações variadas e desbalanceadas. A utilização desse resíduo para suprir a demanda das plantas por alguns nutrientes pode resultar em excesso ou deficiência de outros, caso não haja adubação química complementar.

Conclusões

1. A capacidade de aumentar a CTC e as concentrações de N-NH₄⁺, P-disponível, K-trocável e Zn⁺² nos substratos explicam 99% da eficiência agrônômica dos resíduos utilizados.
2. Nesse sentido, o lodo de esgoto é entre 1,8 e 6,2 vezes mais eficiente que o composto de lixo, quando os dois resíduos foram aplicados em doses equivalentes de matéria seca.
3. O lodo de esgoto é apropriado como fonte de N-NH₄⁺, P-disponível, Zn⁺² e Ca⁺². Comporta-se como razoável fonte de K-trocável e inapropriado como fonte de Mg⁺².

Referências

- ADANI, F. et al. Modification of soil humic matter after 4 years of compost application. **Waste Management**, v. 27, n. 03, p. 319-324, 2007.
- BARROW, N. J.; BOLLAND, M. D. A. A comparison of methods for measuring the effect of level of application on the relative effectiveness of two fertilizers. **Fertilizer Research**, v. 26, n. 01, p. 1-10, 1990.
- BARBARICK, K. A.; IPPOLITO, J. A. Nitrogen fertiliser equivalency of sewage sludge biosolids applied to dryland winter wheat. **Journal of Environmental Quality**, v. 28, n. 07, p. 1345-1351, 2000.
- BEGON, M.; TOWNSEND, C. R.; HARPER, J. L. **Ecology: from individuals to ecosystems**. 4ed. Blackwell Publishing: United Kingdom, 2006. 759 p.
- BERTONCINI, E. I. et al. Effects of sewage sludge amendment on the properties of two Brazilian Oxisols and their humic acids. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 12, p. 4972-4979, 2008.
- BEZERRA, F. B. et al. Lodo de esgoto em revegetação de área degradada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 03, p. 469-476, 2006.
- BOLLAND, M. D. A. Comparative phosphorus requirements of five annual medics. **Journal of Plant Nutrition**, v. 20, n. 09, p. 1029-1043, 1997.
- BOVI, M. L. A. et al. Lodo de esgoto e produção de palmito em pupunheira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 01, p. 153-166, 2007.
- BRADY, N.C.; WEIL, R. R. **The nature and properties of soils**. 13. ed. New Jersey: Prentice-Hall, 2002. 960 p.
- BROWN, S.; LEORNARD, P. Building carbon credits with biosolids recycling. **BioCycle**, v. 45, n. 01, p. 25-29, 2004.
- CORRÊA, R. S.; MÉLO FILHO, B. Desempenho de dois resíduos orgânicos para a sobrevivência de mudas de espécies arbóreas de Cerrado sob condições adversas de área minerada. **Sanare**, v. 21, n. 21, p. 59-66, 2004.
- CORRÊA, R. S.; WHITE, R. E.; WEATHERLEY, A. J. Biosolids effectiveness to yield ryegrass based on their nitrogen content. **Scientia Agrícola**, v. 62, n. 03, p. 274-280, 2005.
- CRUSH, J. R.; SARATHCHANDRA, U.; DONNISON, A. Effect of plant growth on dehydration rates and microbial populations in sewage biosolids. **Bioresource Technology**, v. 97, n. 18, p. 2447-2452, 2006.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 1997. 212 p.
- _____. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro, 1999. 412 p.
- GOEDERT, W. J.; CORRÊA, R. S. Usos, degradação e qualidade do solo. In: CORRÊA, R. S.; BAPTISTA, G. M. M. (Orgs). **Mineração e áreas degradadas no cerrado**. Brasília: Universa, 2004. cap. 08, p. 159-172.
- GUEDES, M. C. et al. Propriedades químicas do solo e nutrição do eucalipto em função da aplicação de lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 02, p. 267-280, 2006.
- RODRIGUES, G. B.; MALTONI, K. L.; CASSIOLATO, A. M. R. Dinâmica da regeneração do subsolo de áreas degradadas dentro do Bioma Cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 01, p. 73-80, 2007.
- SUBDIVISÃO DE ESTUDO E PESQUISA. **Especificações gerais para obras de infra-estrutura aeroportuária: proteção vegetal**. Ministério da Aeronáutica/DIRENG, SDEP, [19--]. n.º 26.76.515, folhas EG 177 a EG 181, mimeo.
- SNEDECOR, G. W.; COCHRAN, W. G. **Statistical methods**. 8. ed. Ames: Iowa State University Press, 1989. 503 p.
- SIMONETE, M. A. et al. Efeito do lodo de esgoto em um argissolo e no crescimento e nutrição de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, n. 10, p. 1187-1195, 2003.
- VALCARCEL, R. et al. Avaliação da biomassa de raízes finas em área de empréstimo submetida a diferentes composições de espécies. **Revista Árvore**, v. 31, n. 05, p. 923-930, 2007.
- WALKER, P. M.; KELLEY, T. R.; SMICIKLAS, K. D. Evaluation of pulverized trommel fines for use as a soil amendment. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 16, p. 7848-7858, 2008.