

Reciclagem de Vinhaça por Meio do Processo da Compostagem





*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Tabuleiros Costeiros
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

ISSN 1678-1961

Dezembro, 2012

Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 74

Reciclagem de Vinhaça por Meio do Processo da Compostagem

Tâmara Cláudia de Araújo Gomes

Aracaju, SE
2012

Embrapa Tabuleiros Costeiros

Av. Beira Mar, 3250
49025-040 Aracaju, SE
Fone: (79) 4009-1344
Fax: (79) 4009-1399
www.cpatc.embrapa.br
cpatc.sac@cpatc.embrapa.br

Comitê Local de Publicações da Embrapa Tabuleiros Costeiros

Presidente: *Ronaldo Souza Resende*

Secretária-executiva: *Raquel Fernandes de Araújo Rodrigues*

Membros: *Ana Veruska Cruz da Silva, Edson Patto Pacheco, Élio César Guzzo, Hymerson Costa Azevedo, Joézio Luis dos Anjos, Josué Francisco da Silva Junior, Paulo César Falanghe Carneiro, Semíramis Rabelo Ramalho Ramos e Viviane Talamini*

Supervisão editorial: *Raquel Fernandes de Araújo Rodrigues*

Normalização bibliográfica: *Josete Melo Cunha*

Tratamento das ilustrações: *Ailla Freire de Azevedo*

Foto da capa: XXXXXXXXXXXX

Editoração eletrônica: *Ailla Freire de Azevedo*

1ª Edição (2012)

On line (2012)

Todos os direitos reservados.

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei no 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa Tabuleiros Costeiros

Gomes, Tâmara Cláudia de Araújo

Reciclagem de vinhaça por meio do processo da compostagem / Tâmara Cláudia de Araújo Gomes. – Aracaju : Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2012.

40 p. (Boletim de Pesquisa / Embrapa Tabuleiros Costeiros, ISSN 1678-1961; 74).

Disponível em: http://www.cpatc.embrapa.br/publicacoes_2012/bp_74.pdf

1. Vinhaça. 2. Compostagem. 3. Adubo. 4. Agricultura sustentável. 5. Cana-de-açúcar. I. Título. III. Série.

CDD 633.61

©Embrapa 2012

Sumário

Resumo	04
Abstract	06
Introdução	08
Material e Métodos	09
Resultados e Discussão	14
Conclusões	34
Referências	36

Reciclagem de Vinhaça por Meio do Processo da Compostagem

Tâmara Cláudia de Araújo Gomes¹

Resumo

O aumento da geração de vinhaça como consequência ao aumento da produção de álcool, aponta para a necessidade do desenvolvimento de novas tecnologias de tratamento, redução e usos alternativos para esse efluente, pois a sua elevada e crescente geração não comportará apenas o uso em fertirrigação. No presente trabalho, a compostagem de resíduos agroindustriais é investigada como uma estratégia de reciclagem da vinhaça, mediante o seu uso em concentrações crescentes no líquido de irrigação das leiras (compostos formulados com bagaço de cana de açúcar, torta de filtro e esterco bovino e fosfato natural de Gafsa). A evolução de parâmetros bioquímicos e espectroscópicos associados com a estabilização biológica e maturidade do composto são avaliados nas formulações selecionadas, tendo-se incluído um tratamento com o enriquecimento com sulfato de potássio sem vinhaça e um tratamento com a torta de filtro (TF). Ao final do período de compostagem verificou-se que para cada quilograma de matéria seca da mistura de resíduos sólidos utilizada na produção dos compostos, foi possível a incorporação de 4,9 L de vinhaça; a qualidade dos compostos com vinhaça foi, em geral, semelhante ao do composto produzido com água, apresentando, no entanto, a vantagem de possuir maior capacidade de troca catiônica; a torta de filtro apresentou maior CTC que os compostos; todos os compostos apresentaram teores maiores de N, CO₂, pH e menores relações C/N do que os limites fixados pela legislação vigente sendo

¹ Engenheira agrônoma, doutora em Agronomia, pesquisadora da Unidade de Execução de Pesquisa de Rio Largo (UEP - Rio Largo) da Embrapa Tabuleiros Costeiros, Rio Largo, AL, tamara.gomes@embrapa.br.

considerados adequados para uso agrícola; considerando os índices referenciais $CTC > 600 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$ e $CTC/CO > 1,9 \text{ mmol}_c \text{ g}^{-1}$, a torta de filtro e os compostos irrigados com a vinhaça a 75 e 100%, apresentaram maior maturidade que os demais compostos avaliados. A compostagem mostrou-se uma estratégia eficiente na reciclagem da vinhaça favorecendo a sua transformação em um insumo de alto valor agrônômico isento do potencial poluidor original.

Palavras-chave: fertilizantes orgânicos, compostos orgânicos, substâncias húmicas, capacidade de troca catiônica, resíduos da agroindústria da cana-de-açúcar.

Recycling Vinasse through the Process of Composting

Abstract

The increased generation of vinasse as a result of increased ethanol production, points to the need for development of new treatment technologies, reduction and alternative uses for this effluent, as it's elevated and growing generation does not only involve use in fertirrigation. In this study, composting of agro-industrial residues is investigated as a strategy for recycling vinasse, through its use in increasing concentrations in the irrigation liquid of the windrows (compost formulated with sugarcane bagasse, filter cake and bovine manure and Gafsa rock phosphate). The evolution of biochemical and spectroscopic parameters associated with the biological stabilization and maturity of the compost are evaluated on selected formulations, that included an enrichment treatment with potassium sulphate without vinasse and a treatment with filter cake (FC). At the end of the composting period, it was found that for each kilogram of dry material of mixed solid residues used in the production of compost, it was possible to incorporate 4.9 L of vinasse; the quality of the compost with vinasse was, in general, similar to the compost produced with water, showing nonetheless, the advantage of having higher cation exchange capacity (CEC); the filter cake showed greater CEC than the compost; all of the compost showed higher levels of N, CO, pH and lower C/N ratios than the limits set by current legislation, being considered suitable for agricultural use; considering the reference indexes $CEC > 600 \text{ mmolc kg}^{-1}$ and $CEC/CO > 1.9 \text{ mmolc g}^{-1}$, the filter cake and the compost irrigated with 75 and 100% vinasse, showed greater maturity than the other compost evaluated. Composting proved to be an effective strategy in

the recycling of vinasse favoring its transformation into an input of high agronomic value exempt from the original potential polluter.

Index terms: Organic fertilizers, organic compost, humic substances, cation exchange capacity, sugarcane agro-industrial wastes.

Introdução

A produção total de álcool no Brasil, resultante da safra 2005/2006, foi da ordem de 16 bilhões de litros, tendo, esse montante se elevado para 22 bilhões na safra 2011/2012 (ÚNICA, 2012). Concomitantemente ao aumento da produção de álcool, é também acrescida a produção de vinhaça, a qual, dos efluentes líquidos da indústria sucroalcooleira, é o que possui maior carga poluidora (SILVA et al., 2007). A grande preocupação advém basicamente de sua composição química e da quantidade na qual é gerada, as quais a tornam um potencial poluidor (MACHADO, 1998). É caracterizada por ser um resíduo com alto conteúdo de matéria orgânica, elementos minerais (K^+ , Ca^{+2} e Mg^{+2}) e baixo pH. Sua coloração marrom escura se deve à presença de polímeros de alto peso molecular, denominados melanoidinas, as quais são freqüentemente tóxicas para microrganismos propícios para os biotratamentos de efluentes e altamente recalcitrantes. São persistentes no solo e possuem propriedades antioxidantes (FERREIRA, 2009; 2010).

Ivo et al. (2008) relatam que os primeiros estudos para aplicação da vinhaça nos solos datam da década de 1950, quando a vinhaça era jogada nos rios e, em razão de sua alta demanda bioquímica de oxigênio (DBO), causava grande mortandade de peixes.

Hoje, a vinhaça é predominantemente aplicada ao solo por meio da fertirrigação. Essa tecnologia, a qual foi praticamente toda desenvolvida no Brasil (IVO et al, 2008), requer, no entanto, o estabelecimento de critérios técnicos para evitar os problemas decorrentes do seu manejo inadequado. Pelo fato de haver diferentes tipos de solo e composições de vinhaça, os resultados dos trabalhos são bastante variáveis, havendo, no entanto, o consenso de que sua disposição deve ser efetuada de acordo com a capacidade do solo em trocar e reter íons (SILVA et al., 2007). Neste particular, a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental de São Paulo – CETESB instituiu a Norma Técnica P4.231, de março/2005, que restringe o uso da vinhaça em fertirrigação com base em seu teor de potássio e no do solo.

Em São Paulo, a restrição à sua aplicação resultou na necessidade de distribuí-la também em áreas distantes da usina, o que, do ponto de vista econômico se torna inviável devido à grande quantidade de água na vinhaça. Uma alternativa para diminuir os custos de transporte, foi a redução do volume por evaporação,

originando a vinhaça concentrada. Neste caso, Silva (2012) observou perdas importantes de Cl^- , NO_3^- e SO_4^{2-} por lixiviação em um solo de textura argilosa do Estado de São Paulo (Latossolo Vermelho-Escuro) submetido a doses de vinhaça concentrada. Por outro lado, verificou a capacidade do solo em reter K^+ , o qual adsorveu grande parte do K^+ existente na vinhaça. Em solos com menores teores de argila e matéria orgânica, baixa CTC e bem drenados, certamente o K^+ seria mais facilmente lixiviado (ERNANI et al, 2007).

Dessa forma, a necessidade do desenvolvimento de novas tecnologias de tratamento, redução e usos alternativos da vinhaça continua evidente, pois a elevada e crescente geração desse efluente não comportará apenas o uso em fertirrigação (PEREIRA, 2003).

Outra destinação para a vinhaça pode ser o seu uso na formulação de compostos orgânicos, a exemplo do que tem sido feito com efluentes da agroindústria do óleo de oliva na Europa. Paredes et al. (2001) consideram a compostagem uma alternativa para a reciclagem do referido resíduo, representando uma maneira econômica e ecologicamente aceitável para eliminá-lo, com um alto potencial de incorporação de efluentes orgânicos. Em experimento desenvolvido por Tomati et al. (1995), num intervalo de 35 dias de processamento, cada 1 kg de palha de trigo utilizado para a elaboração do composto consumiu o volume de 10 L de fluente da industrialização do óleo de oliva.

Especificamente quanto à vinhaça, há a carência de dados quanto aos efeitos que a sua aplicação ao longo do processo de compostagem traria quanto à evolução de características pertinentes à estabilização e humificação do composto. O presente estudo teve por objetivo verificar o efeito da aplicação de vinhaça em resíduos da agroindústria sucro-alcooleira, sobre parâmetros bioquímicos e espectroscópicos associados à estabilização biológica e maturidade dos compostos orgânicos durante seu procesamento.

Material e Métodos

Montagem do experimento

O experimento, constituído pela montagem e condução de leiras de composto orgânico formulados com resíduos da agroindústria sucro-alcooleira, foi instalado em área agrícola pertencente à Cooperativa de Colonização Agropecuária e

Industrial Pindorama Ltda., no município de Coruripe - AL. Foi conduzido no período de novembro de 2008 a abril de 2009, totalizando 152 dias de processamento, em ambiente aberto e localizado a 10°08'38,8" S e 36°19'03,8" W, a 75 m de altitude. O clima é, segundo classificação de Köppen, tropical chuvoso com verão seco, com pluviosidade média anual de 1400 mm e temperatura média de 24,4°C.

As leiras de compostagem foram formuladas com bagaço de cana-de-açúcar e torta de filtro com esterco de bovinos leiteiros, enriquecidos com fosfato natural de Gafsa. Os tratamentos foram constituídos da adição de doses crescentes de vinhaça no líquido de molhamento das leiras (C1 a C5) e pela aplicação de sulfato de potássio (C6). Um tratamento adicional foi estabelecido utilizando-se unicamente torta de filtro (TF), a qual recebeu o mesmo manejo das demais leiras (Tabela 1). A temperatura das leiras foi monitorada diariamente, entre as seis e sete horas da manhã, mediante a tomada de dados em seis pontos aleatórios entre 50 e 70 cm no interior das mesmas.

Tabela 1. Compostos orgânicos formulados com diferentes resíduos agroindustriais e níveis de adição de vinhaça.

Composto orgânico	Composição (materiais sólidos)	Concentração na água de irrigação (%)	Vinhaça
			Volume total (m ³) aplicado por Mg de matéria seca da mistura de resíduos sólidos
C1	BCa + TF + Eb + FG (4:1:1 + 30 kg Mg ⁻¹ , respectivamente; base seca)	0	-
C2	C1	25	1,23
C3	C1	50	2,46
C4	C1	75	3,69
C5	C1	100	4,92
C6	C1 + 30 kg Mg ⁻¹ K ₂ SO ₄ (base seca)	0	-
TF		0	-

BCa: bagaço de cana-de-açúcar; TF: torta de filtro; Eb: esterco bovino; FG: fosfato natural de Gafsa.

Todos os resíduos utilizados foram procedentes da Cooperativa Pindorama, tendo a vinhaça sido coletada do tanque de decantação. A composição de cada material utilizado na formulação dos compostos orgânicos encontra-se na Tabela 2.

Tabela 2. Resultados analíticos pertinentes à análise dos resíduos orgânicos frescos, antes do estabelecimento das pilhas de composto.

Determinação	Bagaço de cana-de-açúcar	Torta de filtro	Esterco bovino	Vinhaça
pH em água*	5,88	5,80	8,28	3,68
CE (mS cm ⁻¹)*	0,378	2,66	2,14	3,04
Umidade (%)	26	69,1	30,9	-
C Orgânico (g kg ⁻¹)	473,43	426,06	300,64	12,21***
N total (g kg ⁻¹)	3,3	31,4	12,3	0,25***
Relação C/N	143,46	13,57	24,44	48,49
K (g kg ⁻¹)	1,86	2,36	8,07	446,10**
P (g kg ⁻¹)	0,27	18,45	2,33	58,56**
Ca (g kg ⁻¹)	2,86	24,46	6,61	493,50**
Mg (g kg ⁻¹)	0,60	3,74	2,20	176,56**
Na (g kg ⁻¹)	0,56	0,60	1,19	92,21**

*Relação 10:1 (água: resíduos sólidos); ** mg L⁻¹; ***g L⁻¹.

Para a montagem das leiras os resíduos foram dispostos em camadas para recebimento do componente líquido. A massa fresca resultante exclusivamente da mistura dos resíduos sólidos foi de 1200 kg (800 kg em base seca). A irrigação das leiras foi realizada por ocasião da sua montagem e dos revolvimentos ao longo do período considerado, totalizando um volume final de 3935 L/leira. Foram realizados seis revolvimentos nos primeiros 45 dias (um a cada semana) e mais três até o final do período (um a cada mês).

Caracterização dos compostos ao longo do período de processamento

Coincidindo sempre com o revolvimento das leiras, foram realizadas oito coletas de amostras do material para cálculo da matéria seca e realização das análises químicas pertinentes. As amostras foram coletadas aleatoriamente no interior das leiras (quatro amostras por leira) aos 6, 14, 29, 41, 57, 89, 119 e 152 dias após a montagem das mesmas.

As amostras foram secas a 60° C, trituradas em moinho tipo Willey e passadas por peneira de 0,5 mm. Foram determinadas a condutividade elétrica em água na relação composto:água igual a 1:10; pH em CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ (relação 1:10); matéria seca com base na perda de peso a temperatura de 105° C e teor de

cinzas por ignição em mufla a 550° C por duas horas, carbono orgânico total por Yeomans e Bremner (1988); nitrogênio orgânico total por pelo método Kjeldahl, de acordo com Miller e Keeney (1982); K, Na, Ca, Mg foram determinados por absorção atômica e P, por colorimetria após mineralização das amostras pelo método 3051A (USEPA, 1998); carbono solúvel em água (CSA) conforme adaptação do método de Bartlett e Ross (1988) descrita por Mendonça e Matos (2005) e filtragem em membrana de ésteres mistos de 0,45 μ m de poro; capacidade de troca de cátions, conforme adaptação da determinação da CTC em turfa (WILLIAMS, 1984) descrita por Rodella e Alcarde (1994). Para a estimativa da atividade biológica dos resíduos orgânicos compostados determinou-se o CO₂ evoluído pelos microrganismos em amostras frescas de composto fresco, mediante sua incubação por três dias em potes fechados, conforme descrito por Alef e Nannipieri (1995).

O fracionamento da matéria orgânica dos compostos seguiu a metodologia proposta por Swift (1996), com adaptações de Mendonça e Matos (2005). Foi determinado o teor de carbono das substâncias com características de ácidos húmicos, ácidos fúlvicos e material particulado, constituintes da matéria orgânica dos compostos e torta de filtro, os quais serão referidos neste trabalho, respectivamente, como fração ácidos húmicos (AH), fração ácidos fúlvicos (AF) e material particulado (MP). Utilizou-se 0,5 g de composto ou torta de filtro seco e triturado, os quais foram colocados em tubos de centrifuga com capacidade para 50 mL. Foram adicionados 10 mL de solução extratora de NaOH 0,1 mol L⁻¹, seguindo-se agitação por 30 minutos e repouso de 16 h. Após esse período, centrifugou-se a 5000 g por 20 minutos, fez-se uma filtragem rápida do sobrenadante, recolhendo-o em um copo plástico descartável de 100 mL. Foram novamente adicionados 10 mL de NaOH 0,1 mol L⁻¹ em cada tubo de centrifuga, agitou-se manualmente até a re-suspensão do precipitado e deixou-se em repouso por 1 hora. Centrifugou-se novamente a 5000g por 20 minutos, filtrou-se o sobrenadante e este foi adicionado ao anterior. O procedimento foi repetido. O precipitado que ficou no fundo do tubo de centrifuga (MP) foi quantitativamente transferido para um tubo de digestão (utilizando-se o mínimo de água deionizada possível) e seco em estufa a 65° C. O extrato alcalino contido nos copos descartáveis foram acidificados até pH 1 pela adição de gotas de H₂SO₄ a 20%, ficando em repouso por 12h. Seguiu-se a centrifugação do extrato a 3000 g por 5 minutos. O sobrenadante contendo a fração ácido fúlvico foi transferido para balão de 50 mL e teve seu volume aferido com água destilada. O precipitado retido no tubo contendo a fração ácido húmico, foi re-diluída com 30 mL de NaOH 0,1 mol L⁻¹, transferida para balão de 50 mL e, seu volume,

aferido com a solução de NaOH 0,1 mol L⁻¹. O teor de carbono orgânico das frações AH, AF e MP foram determinados de acordo com Yeomans e Bremner (1988).

A partir das determinações de CSA, cinzas, umidade, C orgânico total e N total foram calculados os índices de qualidade dos compostos orgânicos de acordo com Drozd et al. (1997): (Índice de Maturidade do Composto – IM ou relação C/N, Índice de Humificação – IH e Índice de Mineralização do Composto – IMC).

- IM, ou Índice de Maturidade ou Relação C/N:

$$IM = \frac{\text{C orgânico total}}{\text{N total}}$$

- IM, ou Índice de Humificação ou Grau de Polimerização:

$$IH = \frac{AH}{AF}$$

- IM, ou Índice de Mineralização do Composto:

$$IMC = \frac{\text{Cinzas}}{\text{C orgânico total}}$$

Análises estatísticas

Utilizando-se o programa SAEG (Sistema de Análises Estatísticas e Genéticas) da Universidade Federal de Viçosa, avaliou-se o efeito do tempo de compostagem e da adição de vinhaça sobre a evolução das características dos compostos e torta de filtro, por meio de análise de regressão, tendo-se submetido os dados a análise de correlação de Pearson. As figuras foram construídas com os valores médios das variáveis, tendo-se utilizado o Software Excel, da Microsoft.

Resultados e Discussão

Temperatura

A variação da temperatura no interior das leiras ao longo dos 152 dias do processo de compostagem encontra-se na Figura 1. A temperatura de todos tratamentos chegou à fase termofílica ($> 45^{\circ}\text{C}$) dentro de dois dias após a montagem das leiras, refletindo o rápido início do processo da compostagem. A rápida elevação da temperatura resulta da intensa atividade microbiana favorecida pela alta concentração de moléculas orgânicas facilmente decomposíveis (JOURAIPHY et al., 2005). A despeito dos revolvimentos semanais, exceto para a leira de torta de filtro, as temperaturas durante as três primeiras semanas superaram os 60°C , limite superior da faixa considerada ideal para a desejável diversidade, atividade e estabilidade microbiana durante a fase termofílica (STROM, 1985). Após esse período, a temperatura começou a decrescer, chegando a valores próximos aos 40°C a partir dos 50 dias para o composto C6 e dos 70 dias para os demais compostos. A torta de filtro apresentou um perfil de temperatura diferenciado, tendo se mostrado muito mais responsiva aos revolvimentos e umedecimentos que os demais tratamentos, com claras oscilações ao longo do processo. A elevação de temperatura no início da compostagem foi mais gradual, tendo-se mantido entre 60 e 50°C até cerca dos 130 dias após o início do processo.

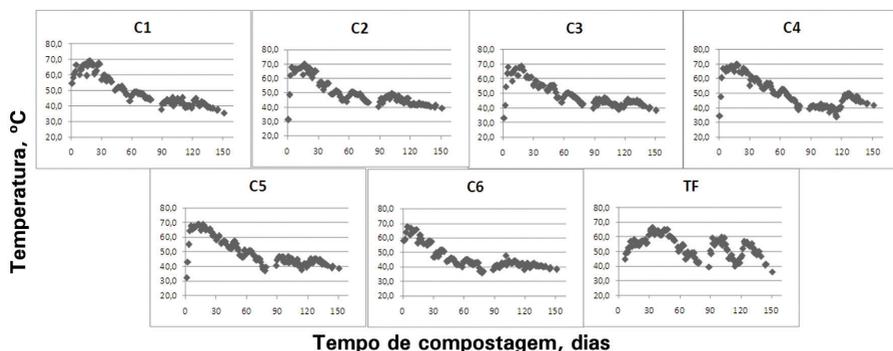


Figura 1. Temperatura no interior das leiras ao longo dos 151 dias do processo de compostagem (média de seis tomadas de temperatura). **C1:** bagaço-de-cana + torta de filtro + esterco bovino (MB) irrigado com água; **C2:** MB irrigado com solução de vinhaça a 25%; **C3:** MB + vinhaça a 50%; **C4:** MB + vinhaça a 75%; **C5:** MB + vinhaça; **C6:** MB + água + sulfato de potássio; **TF:** torta de filtro.

pH

De uma forma geral, não foram observadas grandes variações de pH ao longo do processo de compostagem (Figura 2). Mesmo no composto C5, onde se observou a maior amplitude de variação, o pH esteve limitado a valores entre 6,8 e 7,6. Rotineiramente, o pH é considerado um bom indicador da estabilização de compostos orgânicos devido ao seu comportamento clássico durante a compostagem (AVNIMELECH, 1996; WU et al., 2000; KIEHL, 2004; IYENGAR; BHAVE, 2006), o qual consiste na acidificação inicial do meio, devido a formação de ácidos solúveis os quais são convertidos a dióxido de carbono pela ação microbiana, e na posterior elevação com estabilização em valores alcalinos. Os resultados obtidos não refletiram tal comportamento, tendo concluído o período da compostagem com valores levemente inferiores àqueles iniciais. Os compostos C1, C2, C6 e a torta de filtro nem chegaram a alcançar valores de pH alcalinos. Lima (2006) também observou efeito semelhante, onde alguns dos compostos estudados se mantiveram ácidos até o final do período de compostagem. Para um dos compostos, o autor atribuiu a acidificação observada ao enriquecimento com sulfato de amônio cuja reação ácida liberaria H^+ para o meio.

O padrão de evolução temporal do pH dos compostos que receberam maior adição de vinhaça (C4 e C5) se assemelham mais àquele observado por Eklind e Kirchmann (2000), em estudo sobre o efeito de seis diferentes materiais fibrosos sobre a compostagem de resíduos domésticos. Os autores observaram que até os 35 dias o pH dos compostos aumentou de 6 para valores superiores a 8. Após este período, os valores decresceram lentamente até alcançar um ponto de equilíbrio, com alguns estabilizando em valores de pH ácido. Atribuiu-se a elevação inicial do pH ao processo de formação da amônia durante a mineralização. O posterior decréscimo, consequentemente coincidiu com a formação do nitrato, tendo sido atribuído à provável liberação de H^+ durante a nitrificação.

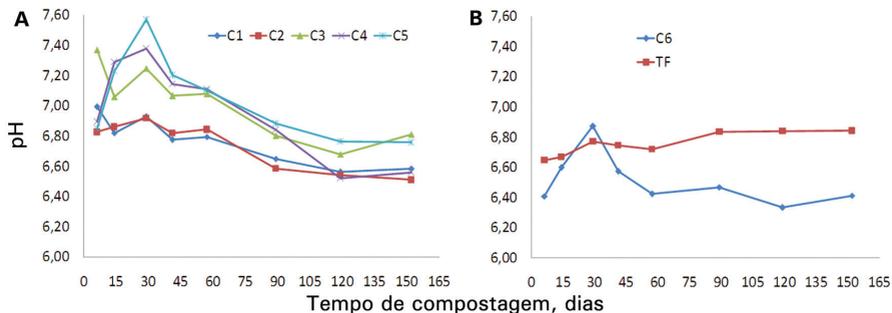


Figura 2. pH de compostos orgânicos formulados com resíduos da agroindústria da cana-de-açúcar adicionados de vinhaça (A) ou sulfato de potássio e da torta de filtro (B), em função do tempo de compostagem (média de quatro repetições).

Considerando o efeito da adição das crescentes concentrações de vinhaça no líquido de irrigação das leiras, o pH médio dos compostos sofreu apenas uma pequena elevação ($r = 0,87$, $P < 0,05$) (Figura 3). No ambiente do solo, a elevação do pH como consequência da aplicação de vinhaça é atribuída por Doelsch et al., (2009) à introdução dos cátions presentes neste efluente e ao decréscimo do Eh resultante da anaerobiose provocada pelo consumo de oxigênio na degradação da matéria orgânica da vinhaça. Os valores de pH obtidos ao final da compostagem (152 dias) não refletiram tal efeito.

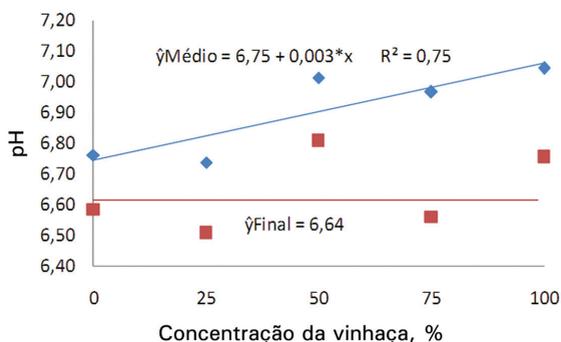


Figura 3. pH médio e final dos compostos orgânicos, formulados com resíduos da agroindústria da cana-de-açúcar, em função do aumento da concentração de vinhaça no líquido de irrigação das leiras (C1, 0%; C2, 25%; C3, 50%; C4, 75%; C5, 100%) (respectivamente, médias de trinta e duas repetições resultantes de oito coletas e de quatro repetições da última coleta); * = significativo pelo teste F a 5%.

Condutividade elétrica (CE)

A condutividade elétrica aumentou ao longo do tempo de compostagem em todos os tratamentos (Figura 4). A produção de compostos inorgânicos como resultado da degradação da matéria orgânica e o aumento da concentração relativa de íons devido à perda de massa da pilha acarreta o aumento da CE (PAREDES et al., 2001). O enriquecimento do composto C6 com sulfato de potássio resultou nos altos valores da CE observados, os quais se destacaram dos demais compostos desde o início do processo.

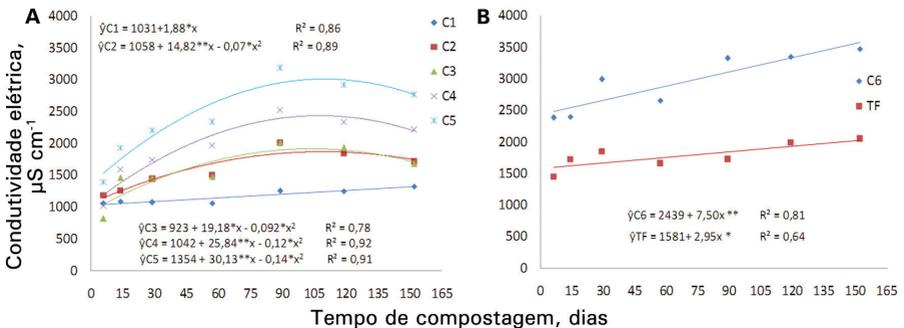


Figura 4. Condutividade Elétrica de compostos orgânicos formulados com resíduos da agroindústria da cana-de-açúcar adicionados de vinhaça (A) ou sulfato de potássio e da torta de filtro (B), em função do tempo de compostagem (média de quatro repetições). **C1:** bagaço-de-cana + torta de filtro + esterco bovino (MB) irrigado com água; **C2:** MB irrigado com solução de vinhaça a 25%; **C3:** MB + vinhaça a 50%; **C4:** MB + vinhaça a 75%; **C5:** MB + vinhaça; **C6:** MB + água + sulfato de potássio; **TF:** torta de filtro; *, ** = significativos pelo teste F, respectivamente, a 5 e 1%.

O aumento da concentração da vinhaça no líquido de irrigação das leiras mostrou-se altamente correlacionado ($r = 0,96$ e $r = 0,95$, $P < 0,01$, respectivamente) com o aumento da condutividade elétrica média e final dos compostos (Figura 5). Este aumento está relacionado com a crescente adição de sais de potássio e sódio, considerando-se que foram usados 3935 L de líquido na irrigação das leiras e que tal volume correspondeu ao acréscimo de 0,4, 0,8, 1,2 e 1,8 kg de K e 0,09, 0,18, 0,27 e 0,36 kg de Na, respectivamente, nos compostos C2, C3, C4 e C5.

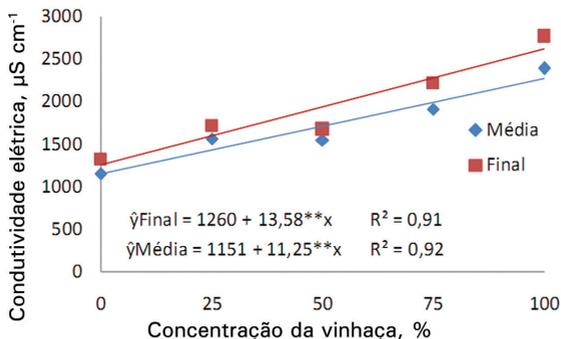
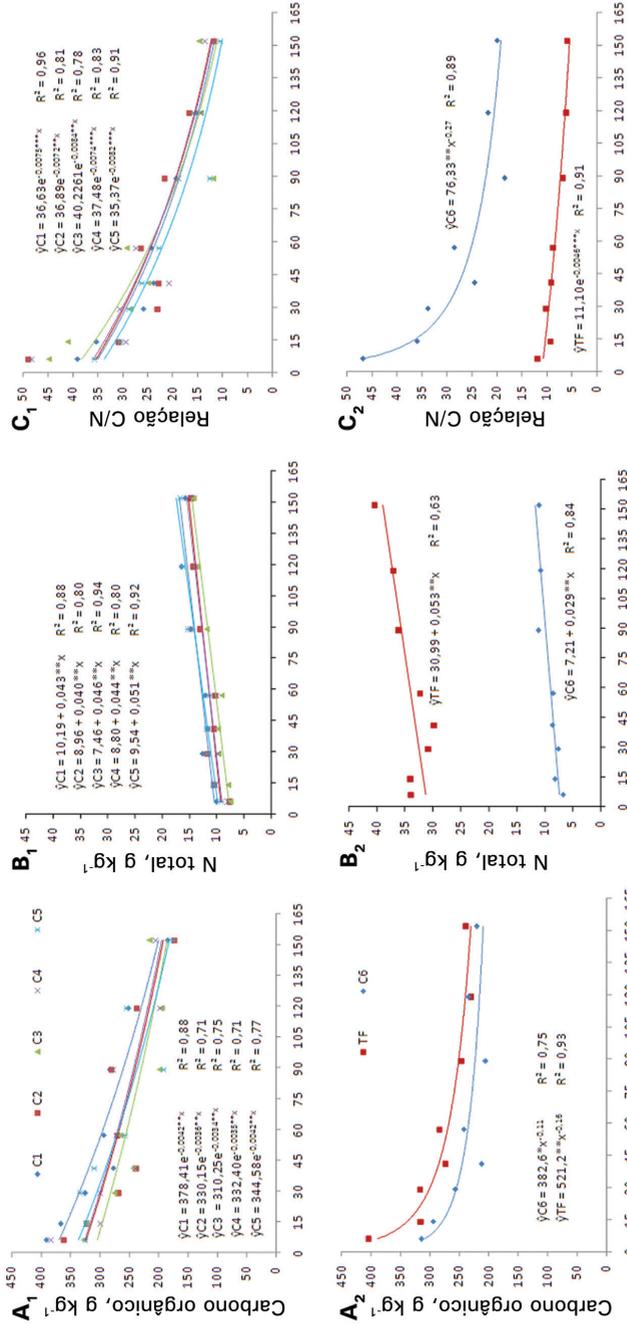


Figura 5. Condutividade Elétrica média e final dos compostos orgânicos, formulados com resíduos da agroindústria da cana-de-açúcar, em função do aumento da concentração de vinhaça no líquido de irrigação das leiras (C1, 0%; C2, 25%; C3, 50%; C4, 75%; C5, 100%) (respectivamente, médias de vinte e oito repetições resultantes de sete coletas e de quatro repetições da última coleta); ** = significativos pelo teste F a 1%.

Carbono orgânico, nitrogênio total, relação C/N

De uma forma geral, o teor de C orgânico e a relação C/N diminuíram durante a compostagem e o de N total aumentou (Figura 6). O decréscimo na concentração de C durante a compostagem é atribuída à mineralização da matéria orgânica, a qual resulta em evolução de CO₂ e calor (SAID-PULLICINO et al., 2007a).



Tempo de compostagem, dias

Figura 6. Teor de carbono orgânico total (A), nitrogênio total (B) e relação C/N (C) de compostos orgânicos formulados com resíduos da agroindústria da cana-de-açúcar adicionados de vinhaça (A₁, B₁ e C₁) ou sulfato de potássio e da torta de filtro (A₂, B₂ e C₂), em função do tempo de compostagem (média de quatro repetições). C1: bagaço-de-cana + torta de filtro + esterco bovino (MB) irrigado com água; C2: MB irrigado com solução de vinhaça a 25%; C3: MB + vinhaça a 50%; C4: MB + vinhaça a 75%; C5: MB + vinhaça; C6: MB + água + sulfato de potássio; TF: torta de filtro; *, ** = significativos pelo teste F, respectivamente, a 5 e 1 %.

A evolução temporal do decréscimo dos teores do C (Figura 6, A₁ e A₂) sugere a continuidade do processo de perda e instabilidade dos materiais no momento da última coleta.

O teor de carbono orgânico inicial das misturas de resíduos e da torta de filtro variou entre 403 e 314 g kg⁻¹, finalizando com valores entre 215 e 173 g kg⁻¹. As menores variações foram encontradas nos tratamentos C6 e C3 (respectivamente, 29,8 e 34,2%) indicando sua mais lenta decomposição em relação aos materiais das demais leiras. Especificamente quanto à leira C6, o comportamento observado sugere o efeito negativo da adição do sulfato de potássio, a qual resultou em altos valores de CE durante a compostagem (em torno de 2,4 mS no início do processo até 3,5 mS no final, Figura 4B), comprometendo a atividade da microbiota decompositora. Durante o período de estudo, os teores de carbono nas demais leiras variaram entre 40,7 (TF) e 52% (C1 e C2).

A concentração de N total nas seis leiras de composto e de torta de filtro (B₁ e B₂, Figura 6), apresentou comportamento similar entre si, aumentando linearmente à medida que o processo evoluía. Tal efeito é resultante da concentração causada pela perda de massa da leira, associada à mineralização da matéria orgânica (SÁNCHEZ-MONEDERO et al., 2001).

A evolução da relação C/N é um importante critério usado para avaliação da eficiência do processo de compostagem e estabilidade do composto. O declínio de valores iniciais no substrato próximos a 30 para valores finais no composto em torno de 15 indicam o alcance de um grau apropriado de estabilização da matéria orgânica (CARICASOLE et al., 2010).

Os valores da relação C/N obtidos no início da compostagem (aos 6 dias após a montagem das leiras) variou entre 36 a 49 (C₁ e C₂, Figura 6). Ao final do período, o composto C6 (material enriquecido com sulfato de potássio) foi aquele que apresentou relação C/N mais elevada (19,97), situando-se próximo ao limite máximo (20) considerado pelo Ministério de Agricultura como garantia para a comercialização de compostos orgânicos estáveis. Os demais compostos apresentaram valores inferiores a 15, com destaque para a torta de filtro (5,92) cuja relação C/N inicial (11,89) já era baixa por ocasião da primeira amostragem (6 dias), em virtude de seu alto teor de N. De uma forma geral, a relação C/N dos compostos apresentou uma variação significativa ao longo do período de compostagem com reduções de 70, 76, 67, 72, 71 e 57%, respectivamente para os compostos C1 a C6, e apenas 50% no caso da torta de filtro. Especificamente

para esta última, a relação C/N não seria um indicador de estabilidade adequado, uma vez que apesar de seus baixos valores, o monitoramento da temperatura mostra que durante quase todo o período considerado esta se encontrava em plena fase termofílica, não podendo, conseqüentemente estar estável. Ademais, como o valor inicial da relação C/N influencia o valor da relação C/N ao final da compostagem, esta, por si só não é suficiente para avaliar o estado de degradação do composto (DOMEIZEL et al., 2004).

Na Figura 7 é analisada a influência da aplicação da vinhaça sobre o teor médio (média dos valores observados durante o processamento) e final (nas amostras da última coleta) de C e N total dos compostos. Os teores médios de N em cada tratamento se mostraram mais influenciados pela irrigação com vinhaça que os teores de carbono. O padrão quadrático observado sugere o estabelecimento de um efeito análogo ao “efeito priming”, onde o acréscimo de vinhaça em concentrações mais baixas resultou na redução dos teores de N, tendo desaparecido à medida que se utilizou a vinhaça pura. O “efeito priming” é um processo complexo que corresponde a alteração das taxas de mineralização da matéria orgânica do solo (MOS), após a entrada de matéria orgânica fresca, a qual é controlada por diversos fatores como a composição da comunidade microbiana, a estrutura química da MOS e disponibilidade de nutrientes (GUENET; LELOUP, 2010). Kuzyakov et al. (2000) ressaltam que o fenômeno, na verdade, é amplo, e trata de uma mudança (na maior parte das vezes, em aceleração) no processo natural de mineralização através de um gatilho, como por exemplo, a entrada de uma fonte de energia facilmente decomponível, sendo encontrados não só para C e N, mas também para P e alguns outros nutrientes. No solo, a adição de diferentes substâncias poderia causar não só uma aceleração da mineralização (efeito priming positivo), mas também a sua redução, ou uma imobilização do C ou N adicionado. Nestes casos, se fala de efeito priming negativo, como, por exemplo, a indisponibilidade temporal de N, devido à imobilização.

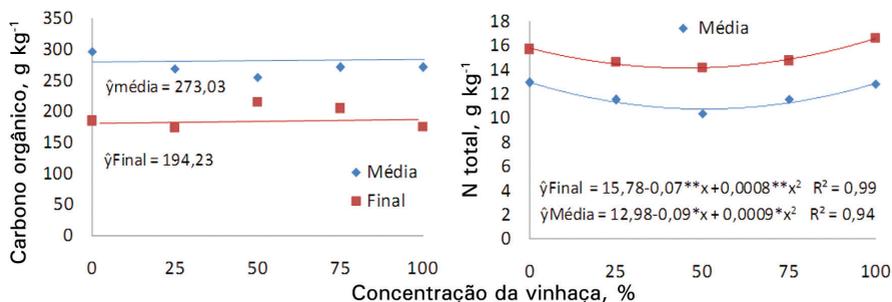


Figura 7. Teores médios e finais de carbono orgânico e nitrogênio total dos compostos orgânicos, formulados com resíduos da agroindústria da cana-de-açúcar, em função do aumento da concentração de vinhaça no líquido de irrigação das leiras (C1, 0%; C2, 25%; C3, 50%; C4, 75%; C5, 100%) (respectivamente, médias de trinta e duas repetições resultantes de oito coletas e de quatro repetições da última coleta). *, ** = significativos pelo teste F, respectivamente, a 5 e 1%.

Analogamente, a adição de nutrientes por meio da vinhaça diluída e matéria orgânica fresca facilmente decomponível pode ter propiciado tal efeito sobre os teores de nitrogênio dos compostos C2, C3 e C4, não se manifestando no composto C5 o qual recebeu a vinhaça pura e uma carga maior de N na forma orgânica.

Sobre os valores médio e final da relação C/N dos compostos, também não se observou a influência do aumento da concentração da vinhaça no líquido de irrigação das leiras (ausência de correlação linear entre as variáveis ou ajuste dos dados aos modelos de regressão testados).

Cinzas e Índice de Mineralização do Composto (IMC)

O teor inicial de cinzas dos compostos esteve em torno de 36 dag kg⁻¹, tendo-se observado sua elevação até o final do período de compostagem (Figura 8). O maior aumento foi observado na torta de filtro (aproximadamente 72%), a qual apesar do baixo teor inicial (25,6 dag kg⁻¹) encerrou o período de processamento com o teor de cinzas em torno de 48 dag kg⁻¹. Contrariamente, no composto C6, o qual recebeu sulfato de potássio no início da compostagem, a intensidade do aumento foi o menor dentre os tratamentos considerados, representando apenas 26%. O aumento das cinzas durante a compostagem se deve a redução da matéria orgânica pela liberação de CO₂ e água, acarretando seu aumento relativo ao final do processo, bem como à mineralização da matéria orgânica, a qual eleva o teor de minerais no composto (Lima, 2006). Neste sentido pode-se inferir que

torta de filtro e o composto C6, apresentam, respectivamente, a maior e a menor intensidade de mineralização dentre os materiais estudados.

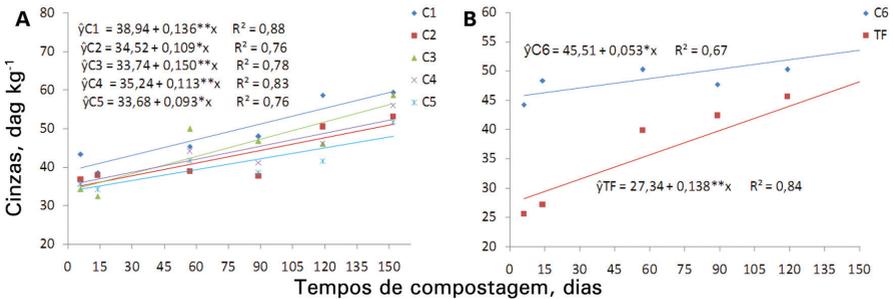


Figura 8. Teor de cinzas de compostos orgânicos formulados com resíduos da agroindústria da cana-de-açúcar adicionados de vinhaça (A) ou sulfato de potássio e da torta de filtro (B), em função do tempo de compostagem (média de duas repetições). **C1:** bagaço-de-cana + torta de filtro + esterco bovino (MB) irrigado com água; **C2:** MB irrigado com solução de vinhaça a 25%; **C3:** MB + vinhaça a 50%; **C4:** MB + vinhaça a 75%; **C5:** MB + vinhaça; **C6:** MB + água + sulfato de potássio; **TF:** torta de filtro. *, ** = significativos pelo teste F, respectivamente, a 5 e 1 %.

O teor médio de cinza dos compostos foi inversamente proporcional ao aumento da concentração de vinhaça na irrigação das leiras ($r = -0,80$, $P < 0,06$) e, conseqüentemente, ao aumento da CE ($r = -0,88$, $P < 0,05$), não tendo influído, no entanto, nos teores observados ao final do processo.

O índice de mineralização do composto relaciona o teor de cinzas do material ao seu teor de matéria orgânica, constituindo um indicador complementar à avaliação da maturidade do composto (DROZD et al., 1997). A medida que a humificação do material orgânico vai se processando, tem-se a elevação do IMC (LIMA, 2006).

Observando as curvas ajustadas aos dados obtidos (Figura 9), apenas a torta de filtro apresentou comportamento distinto, tendo-se ajustado ao modelo de regressão potencial, mostrando uma maior intensidade de mineralização no início do período de compostagem e diminuindo de intensidade após os 60 dias. Ressalta, também, os mais elevados índices de mineralização do composto C6, os quais, por se mostrarem altos desde o início do processamento, refletem mais o enriquecimento mineral sofrido com o acréscimo do sulfato de potássio, que a mineralização da matéria orgânica.

Em todos os tratamentos, no entanto, os modelos melhor ajustados (exponencial e potencial) sugerem a instabilidade dos materiais por ocasião da última coleta (152 dias).

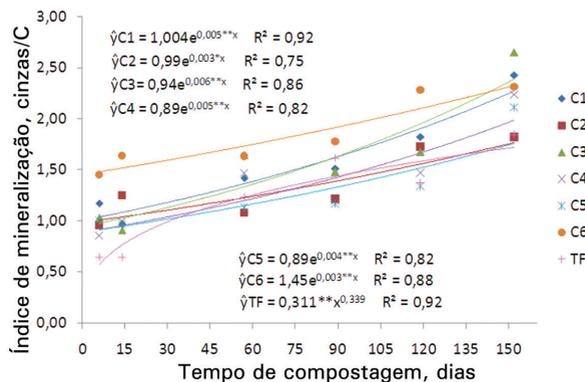


Figura 9. Variação do índice de mineralização (cinzas/C) de compostos orgânicos formulados com resíduos da agroindústria da cana-de-açúcar adicionados de vinhaça ou sulfato de potássio e da torta de filtro, em função do tempo de compostagem (média de quatro repetições). **C1:** bagaço-de-cana + torta de filtro + esterco bovino (MB) irrigado com água; **C2:** MB irrigado com solução de vinhaça a 25%; **C3:** MB + vinhaça a 50%; **C4:** MB + vinhaça a 75%; **C5:** MB + vinhaça; **C6:** MB + água + sulfato de potássio; **TF:** torta de filtro. *, ** = significativos pelo teste F, respectivamente, a 5 e 1%.

Carbono Solúvel em Água (CSA) e atividade microbiana

O teor do carbono orgânico total dissolvido ou solúvel é a medida quantitativa da matéria orgânica solúvel em extratos aquosos de solo ou composto (PUGLISI et al., 2010). A matéria orgânica solúvel em água, por sua vez, representa a fração química e biologicamente mais ativa do composto, sendo a mais sujeita a mudanças, refletindo diretamente o processo de transformação durante a compostagem (CHEFETZ et al., 1998).

Nos compostos em estudo, a concentração inicial do CSA variou entre 0,64 e 0,38 dag kg⁻¹, enquanto que na torta de filtro a concentração inicial de CSA foi de 3,17 dag kg⁻¹ (A₁ e A₂, Figura 10). Ao final do período de compostagem estes teores haviam decrescido para valores entre 0,22 e 0,14 dag kg⁻¹, muito menores que o limite sugerido por Bernal et al. (1998), que propuseram CSA < 1,7 dag kg⁻¹

como um limite que refletiria um bom grau de maturação. Há que se considerar, no entanto, a inadequação do limite sugerido, uma vez que, exceto pela torta de filtro, todos os compostos já teriam seus teores iniciais de CSA inferiores a ele. Mesmo para a torta de filtro, tal limite já seria superado a partir dos 40 dias, ocasião em que a concentração de CSA já era de 0,40 dag kg⁻¹e a torta se encontrava em plena fase termofílica.

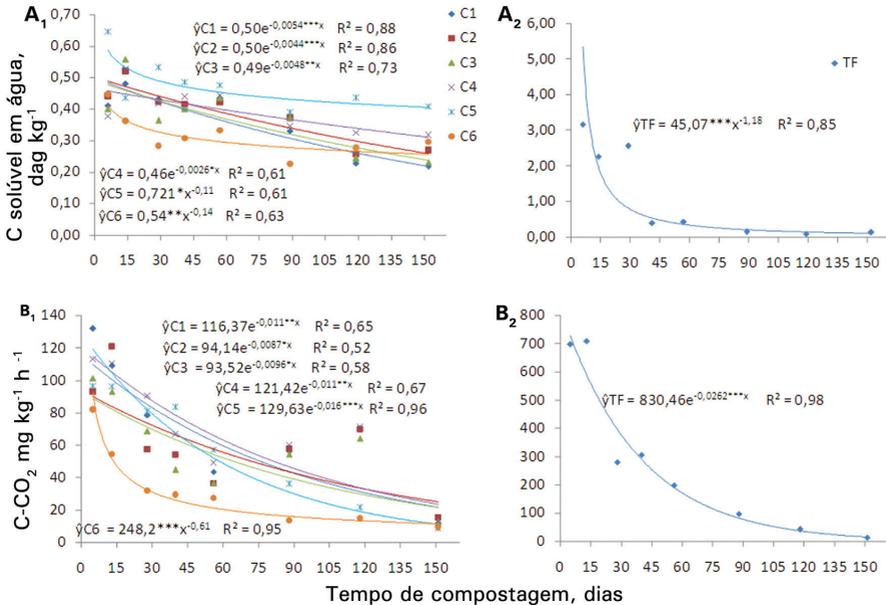


Figura 10. Teor de carbono solúvel em água (CSA) e atividade microbiana expressa pela evolução de C-CO₂ de compostos orgânicos formulados com resíduos da agroindústria da cana-de-açúcar adicionados de vinhaça ou sulfato de potássio (A) e da torta de filtro (B), em função do tempo de compostagem (média de quatro repetições). **C1:** bagaço-de-cana + torta de filtro + esterco bovino (MB) irrigado com água; **C2:** MB irrigado com solução de vinhaça a 25%; **C3:** MB + vinhaça a 50%; **C4:** MB + vinhaça a 75%; **C5:** MB + vinhaça; **C6:** MB + água + sulfato de potássio; **TF:** torta de filtro. *, **, *** = significativos pelo teste F, respectivamente, a 5, 1 e 0,1%.

Para os compostos, a maneira pela qual o teor de CSA mudou ao longo do período de processamento foi similar, exceto para o C6 o qual além de ter sempre apresentado concentrações menores, decresceu com mais intensidade no início da compostagem, estabilizando ao redor dos 40 dias. Os resultados obtidos para a torta de filtro se ajustaram a um modelo de decaimento potencial, o qual se caracterizou por um vertiginoso decréscimo nos primeiros 30 dias,

finalizando com valor de $0,14 \text{ dag kg}^{-1}$ (decréscimo de 95,63%). Conforme Iannotti et al (1994), o CSA extraído de compostos imaturos contém açúcares, substâncias fenólicas, ácidos orgânicos e amino-ácidos, peptídeos e outras substâncias facilmente biodegradáveis. No composto maduro, a maioria do C orgânico solúvel em água está presente como substâncias húmicas as quais são mais resistentes à decomposição, explicando o aumento da estabilidade observada com o tempo de compostagem.

A atividade microbiana refletida pela evolução de CO_2 durante a incubação das amostras obtidas ao longo do período de compostagem mostrou valores decrescentes (B_1 e B_2 , Figura 10). Em média, a evolução de C- CO_2 ao longo do processo de compostagem foi altamente correlacionada com a concentração de C solúvel em água ($r = 0,91$, $P < 0,001$). Individualmente, foi no composto C6 e na TF onde o comportamento da atividade microbiana foi mais influenciado pelos teores do CSA ($r = 0,91$, $P < 0,001$ e $r = 0,84$, $P < 0,01$, respectivamente). Especificamente quanto ao C6, os teores de CSA estiveram altamente e negativamente associados à evolução temporal da CE ($r = -0,84$, $P < 0,001$), o qual claramente exibiu um comportamento distinto, com uma queda de atividade acentuada nos primeiros 30 dias após o início da compostagem evidenciando o possível estresse osmótico para a microbiota, propiciado pela quantidade e aplicação em dose única de sulfato de potássio usada para enriquecimento da mistura. Embora o padrão de evolução temporal apresentado pela atividade microbiana na torta de filtro tenha se mostrado semelhante, nesta, as causas parecem ter estado mais associadas à composição do material de origem, com a disponibilidade e exaustão dos compostos facilmente decomponíveis, que à evolução da CE ($r = -0,60$, $P < 0,05$). Vale ressaltar que na TF, a atividade microbiana foi aproximadamente, sete vezes maior que aquelas dos compostos.

Os teores médios e final do CSA nos compostos (Figura 11, A) foram fortemente influenciados pelo acréscimo da vinhaça no líquido de irrigação das leiras, conforme observado pelas altas correlações positivas encontradas (respectivamente, $r = 0,83$ e $r = 0,88$, com $P < 0,05$). Os teores mais elevados de CSA foram sempre encontrados no composto irrigado com a vinhaça pura (C5), o que pode ser atribuído à hidrólise e solubilização de substâncias orgânicas pesentes no composto bem como ao acúmulo de compostos orgânicos solúveis em água derivados das frequentes irrigações com a vinhaça (PAREDES et al., 2001). Na caracterização espectroscópica da vinhaça realizada por Doelsch et al. (2009), observa-se que os açúcares representavam cerca de 44% do C total da amostra, e que estes correspondiam a 58% do C alifático presente.

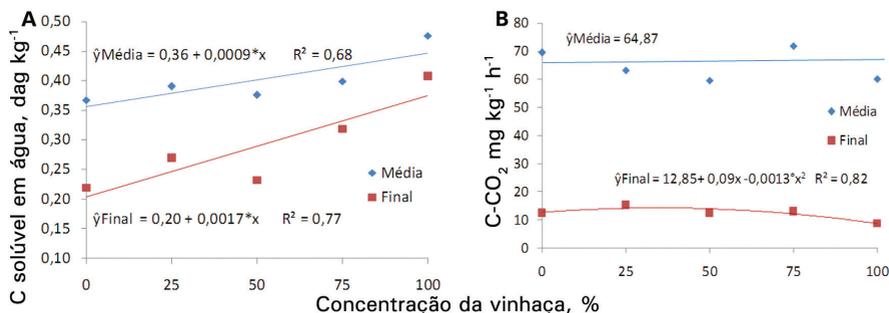


Figura 11. Teores médio e final de carbono solúvel em água (CSA) e atividade microbiana (evolução de C-CO₂) de compostos orgânicos formulados com resíduos da agroindústria da cana-de-açúcar, em função do aumento da concentração de vinhaça no líquido de irrigação das leiras (C1, 0%; C2, 25%; C3, 50%; C4, 75%; C5, 100%). Os teores médios de CSA e atividade microbiana respectivamente resultaram de dezesseis e vinte e quatro repetições provenientes das oito coletas, enquanto os teores finais resultaram, respectivamente, de duas e três repetições da última coleta. *, ° = significativos pelo teste F, respectivamente a 5 e 10%.

A atividade microbiana média e final de cada composto não apresentaram relação linear com as concentrações crescentes de vinhaça, apesar do padrão de distribuição dos resultados desta última ter se ajustado a um modelo quadrático, onde o composto C5 apresentou menor atividade que os demais (Figura 11, B).

Capacidade de Troca de Cátions (CTC) e relação CTC/CO

A CTC mede a capacidade de compostos, minerais e matéria orgânica do solo de reter cátions trocáveis para equilibrar as cargas negativas do material. As fontes das cargas negativas no composto incluem a dissociação de grupos funcionais acídicos (principalmente os carboxílicos e fenólicos), cuja presença se dá em decorrência da oxidação de cadeias laterais de anéis aromáticos ou pela hidrólise de ésteres ou lactonas. Uma vez que tais processos estão associados ao avanço da compostagem, estes resultam no aumento da CTC do composto, cuja determinação tem sido usada na estimativa de seu grau de humificação (LAX et al., 1986).

Nos compostos, a CTC variou entre 159,9 e 209,8 $\text{mmol}_c \text{kg}^{-1}$ no início da compostagem, tendo dobrado até ao final do período (entre 350,5 e 526,7 $\text{mmol}_c \text{kg}^{-1}$), com o composto da leira C6 sendo aquele que apresentou os valores mais baixos (Figura 12). A torta de filtro, cuja CTC já iniciou com um valor relativamente mais alto que o dos compostos (495,7 $\text{mmol}_c \text{kg}^{-1}$), ao fim

do período de processamento alcançou $755 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$. Considerando valores de $\text{CTC} > 600 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$ como indicativos de maturidade do composto, conforme proposto por Harada e Inoko (1980), apenas a torta de filtro poderia ser considerada madura ao final do período considerado (152 dias). Dentre os compostos obtidos, apenas o C4 (irrigado com vinhaça a 75%) e o C5 (irrigado com vinhaça pura) chegariam mais próximos deste limite (respectivamente $526,7$ e $512,5 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$).

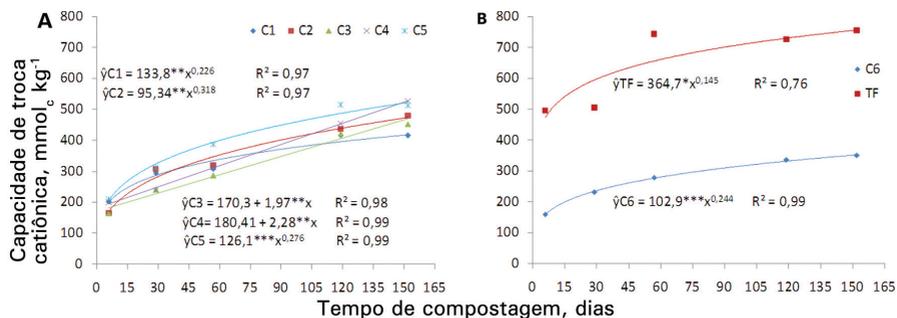


Figura 12. Capacidade de troca de cátions (CTC) de compostos orgânicos formulados com resíduos da agroindústria da cana-de-açúcar adicionados de vinhaça (A) ou sulfato de potássio e da torta de filtro (B), em função do tempo de compostagem (média de duas repetições). **C1:** bagaço-de-cana + torta de filtro + esterco bovino (MB) irrigado com água; **C2:** MB irrigado com solução de vinhaça a 25%; **C3:** MB + vinhaça a 50%; **C4:** MB + vinhaça a 75%; **C5:** MB + vinhaça; **C6:** MB + água + sulfato de potássio; **TF:** torta de filtro. *, **, *** = significativos pelo teste F, respectivamente, a 5, 1 e 0,1%.

Inbar et al. (1989) observou que a CTC aumentou rapidamente nos primeiros 60 dias de compostagem. Ao final do período, foi observado um valor três vezes maior que o inicial (de 630 para $1810 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$). Os autores observaram que o conteúdo de substâncias húmicas, a relação C/N e a CTC se mostraram altamente correlacionadas entre si.

A relação CTC/CO também permite inferir o grau de maturação dos compostos uma vez que o aumento da CTC está relacionado com os grupos funcionais das SH (ROIG et al., 1988). Considerando a relação $\text{CTC}/\text{CO} > 1,9 \text{ mmol}_c \text{ g}^{-1}$ proposto por Iglesias-Jimenez e Perez-Garcia (1992) como parâmetro de maturidade, apenas os compostos que receberam vinhaça C3, C4 e C5, além da torta de filtro (respectivamente, $2,0$, $2,1$, $2,1$ e $3,2 \text{ mmol}_c \text{ g}^{-1}$) poderiam ser considerados maduros (Figura 13). Tal limite, no entanto é questionado por Paredes et al. (2001), em seu trabalho com a compostagem de resíduos agroindustriais com o uso de águas residuárias do processamento da oliva. Neste,

o limite de $1,9 \text{ mmol}_c \text{ g}^{-1}$ foi ultrapassado no início do experimento em todos os compostos, não podendo, portanto, ser usado como indicador de maturidade.

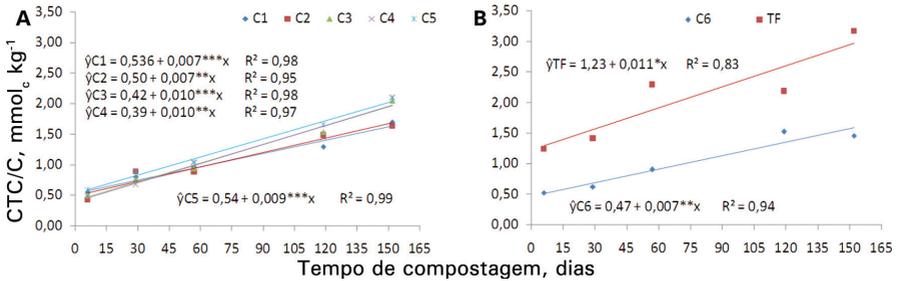


Figura 13. Relação CTC/CO de compostos orgânicos formulados com resíduos da agroindústria da cana-de-açúcar adicionados de vinhaça (A) ou sulfato de potássio e da torta de filtro (B), em função do tempo de compostagem (média de quatro repetições). **C1:** bagaço-de-cana + torta de filtro + esterco bovino (MB) irrigado com água; **C2:** MB irrigado com solução de vinhaça a 25%; **C3:** MB + vinhaça a 50%; **C4:** MB + vinhaça a 75%; **C5:** MB + vinhaça; **C6:** MB + água + sulfato de potássio; **TF:** torta de filtro. *, **, *** = significativos pelo teste F, respectivamente, a 5, 1 e 0,1%.

A adição da vinhaça nos compostos influenciou mais a CTC final dos mesmos que sua CTC média (respectivamente, $r = 0,85$, $P < 0,05$ e $r = 0,71$, $P < 0,10$). Por sua vez, os valores das relações CTC/CO final e média dos compostos se mostraram altamente correlacionados com a concentração crescente da vinhaça no líquido de irrigação das leiras C1 a C5 (respectivamente, $r = 0,87$, $P < 0,05$ e $r = 0,94$, $P < 0,01$) (Figura 14). Os efeitos observados sugerem a influência de compostos orgânicos negativamente carregados e de baixo ponto de carga zero – PCZ, como os presentes na vinhaça (RIBEIRO et al., 2011), os quais, adicionados durante o processamento do composto, contribuíram para o aumento da CTC.

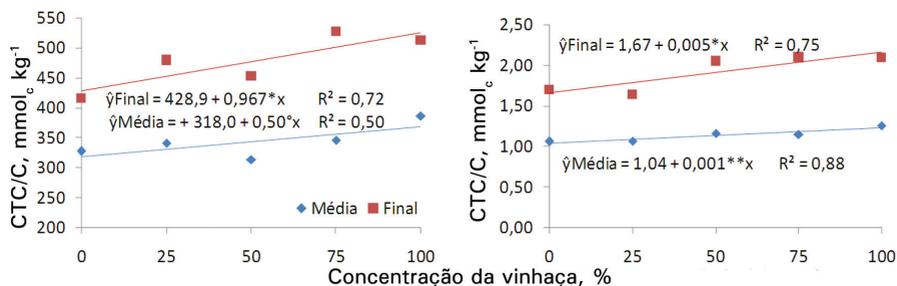


Figura 14. Capacidade de troca de cátions (CTC) e razão CTC/CO médias e finais de compostos formulados com resíduos da agroindústria da cana-de-açúcar, em função do aumento da concentração de vinhaça no líquido de irrigação das leiras (C1, 0%; C2, 25%; C3, 50%; C4, 75%; C5, 100%) (respectivamente, médias de dezesseis repetições resultantes de oito coletas e duas repetições da última coleta). °, *, ** = significativos pelo teste F, respectivamente, a 10, 5 e 1%.

Fracionamento da matéria orgânica (ácidos húmicos - AH, ácidos fúlvicos - AF e material particulado - MP) e Índice de Humificação (IH)

O estudo da evolução dos teores das frações húmicas durante o processo da compostagem é útil para reforçar o entendimento das alterações sofridas pela matéria orgânica ao longo do processo.

A evolução temporal dos teores dos AH, AF e MP nos compostos e torta de filtro em estudo é apresentada na Figura 15. Os teores da fração AF e o MP mostram uma clara tendência de decréscimo, enquanto a fração AH apresenta teores crescentes, exceto aqueles dos compostos C3 e C6, cujos dados não apresentaram padrão de comportamento nítido ao longo do processo da compostagem. Veeken et al. (2000) ponderam que os teores crescentes de AH durante a compostagem representam o avanço do grau de humificação e maturidade do composto. Em geral, compostos frescos contêm níveis baixos de AH e altos níveis de AF. A medida que a compostagem avança, observa-se a tendência do aumento do teor de AH e da diminuição de AF (DROZD et al., 1997).

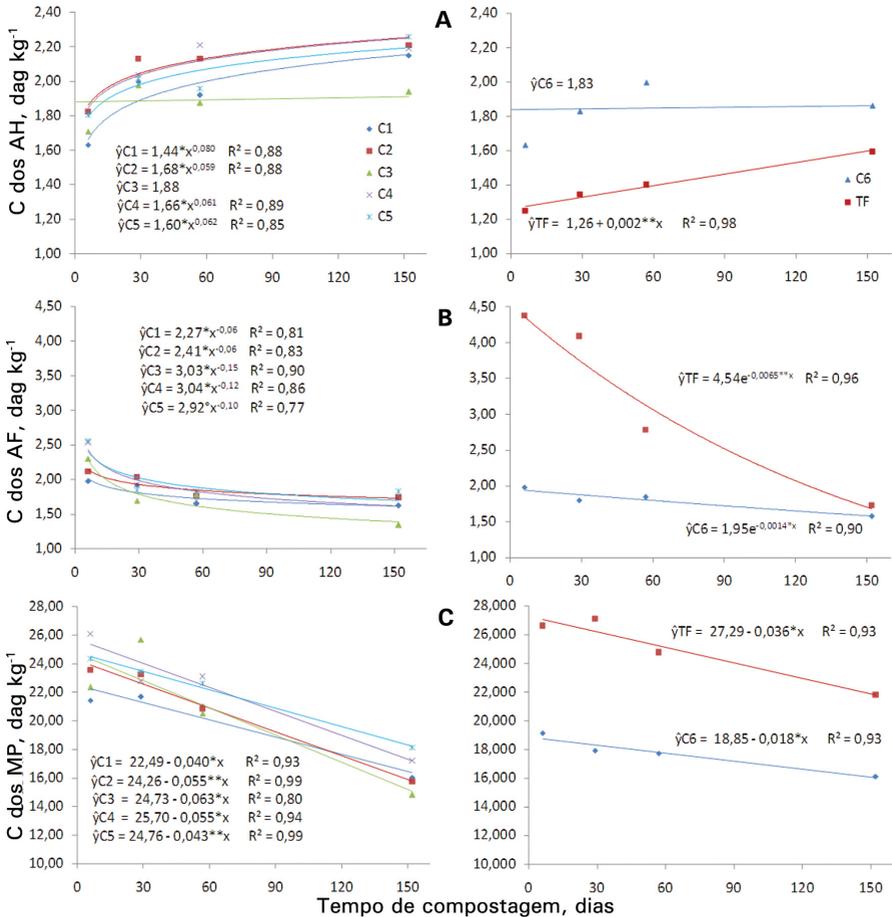


Figura 15. Teores de ácidos húmicos – AH (A), ácidos fúlvicos – AF (B) e material particulado – MP (C) de compostos orgânicos formulados com resíduos da agroindústria da cana-de-açúcar adicionados de vinhaça ou sulfato de potássio e da torta de filtro, em função do tempo de compostagem (média de quatro repetições). **C1:** bagaço-de-cana + torta de filtro + esterco bovino (MB) irrigado com água; **C2:** MB irrigado com solução de vinhaça a 25%; **C3:** MB + vinhaça a 50%; **C4:** MB + vinhaça a 75%; **C5:** MB + vinhaça; **C6:** MB + água + sulfato de potássio; **TF:** torta de filtro. °, *, ** = significativos pelo teste F, respectivamente, a 10 e 5%.

Quando relacionamos os teores de C das SH obtidas, aos teores de carbono resultantes da soma das frações extraídas, as tendências de comportamento ficam mais claras (Tabela 3). Em todos os tratamentos foi observada a tendência do aumento do teor do C dos AH em relação ao C orgânico total, o qual está

de acordo com outros estudos de compostagem. Zbytniewski e Buszewski (2005) observaram que a presença do AH aumentou progressivamente durante o processo, a partir de 8,94% até 13,90% de C e o nível de AF gradualmente diminuiu de 11,56% para 8,38% do C no final da compostagem.

Tabela 3. Teor das frações ácidos húmicos (AH), fúlvicos (AF) e material particulado (MP) em relação ao carbono orgânico total de compostos formulados com resíduos da agroindústria da cana-de-açúcar aos 6 e 152 dias após o início do processo de compostagem.

Tratamento	AH		AF		MP	
	% de CO					
	6 d	152 d	6 d	152 d	6 d	152 d
C1	6,52	10,86	7,90	8,19	85,58	80,95
C2	6,63	11,21	7,68	8,82	85,69	79,98
C3	6,48	10,72	8,74	7,43	84,78	81,86
C4	5,99	10,36	8,33	8,22	85,68	81,42
C5	6,28	10,17	8,89	8,21	84,82	81,62
C6	7,18	9,53	8,70	8,05	84,12	82,42
TF	3,87	6,34	13,58	6,88	82,55	86,78

C1: bagaço-de-cana + torta de filtro + esterco bovino (MB) irrigado com água; **C2:** MB irrigado com solução de vinhaça a 25%; **C3:** MB + vinhaça a 50%; **C4:** MB + vinhaça a 75%; **C5:** MB + vinhaça; **C6:** MB + água + sulfato de potássio; **TF:** torta de filtro.

Avaliou-se a influência do acréscimo da vinhaça no material de irrigação das leiras a partir dos valores médios e finais dos teores das frações extraídas em cada composto (Figura 16). Das frações húmicas consideradas, os teores médios de C dos AF (Figura 16, B) se mostraram mais correlacionados com o acréscimo da vinhaça ($r = 0,75$, $P < 0,05$) que o dos AH (Figura 16, A), os quais não apresentaram relação linear significativa.

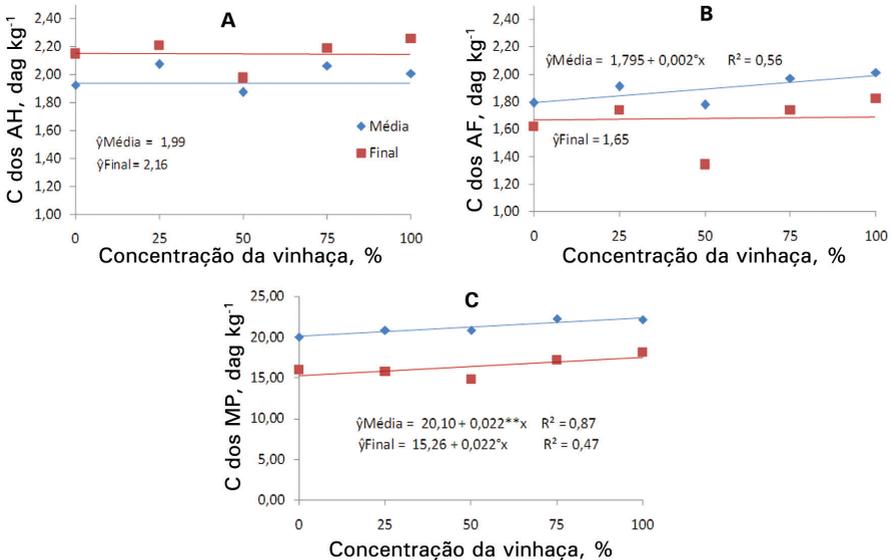


Figura 16. Teores de ácidos húmicos – AH (A), ácidos fúlvicos – AF (B) e material particulado – MP (C) médios e finais dos compostos formulados com resíduos da agroindústria da cana-de-açúcar, em função do aumento da concentração de vinhaça no líquido de irrigação das leiras. (C1, 0%; C2, 25%; C3, 50%; C4, 75%; C5, 100%) (respectivamente, médias de oito repetições resultantes de quatro coletas e duas repetições da última coleta). °, ** = significativos pelo teste F, respectivamente, a 10 e 1%.

O índice de humificação ou grau de polimerização (AH/AF) é sensível ao processo de humificação e tem sido proposto por Sanchez-Monedero et al. (1999) e Tomati et al. (2000) como um índice de maturidade. O aumento desta relação ao longo do processamento do composto é explicada tanto pela formação de moléculas complexas (AH) como resultado da polimerização das moléculas simples (AF), quanto pela biodegradação dos componentes não-húmicos, ou facilmente decomponíveis da fração AF, seguida pela formação de estruturas húmicas mais policondensadas (JOURAIPHY et al., 2005). Os valores da relação AH/AF dos compostos obtidos mostraram excelente ajuste matemático ao modelo de regressão potencial, caracterizando uma maior intensidade de polimerização no início do processamento do composto e a desaceleração do processo a partir dos 60 dias de compostagem (Figura 17). Os valores obtidos a partir das amostras da torta de filtro apresentaram comportamento linear crescente. Exceto por esta última, os demais materiais terminaram o período de 152 dias da compostagem com valores maiores que 1, ressaltando o predomínio da fração AH sobre a AF.

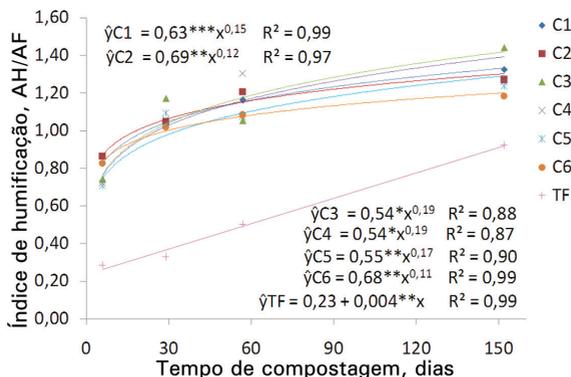


Figura 17. Índice de humificação (AH/AF) de compostos orgânicos formulados com resíduos da agroindústria da cana-de-açúcar adicionados de vinhaça ou sulfato de potássio e da torta de filtro, em função do tempo de compostagem (média de duas repetições). **C1:** bagaço-de-cana + torta de filtro + esterco bovino (MB) irrigado com água; **C2:** MB irrigado com solução de vinhaça a 25%; **C3:** MB + vinhaça a 50%; **C4:** MB + vinhaça a 75%; **C5:** MB + vinhaça; **C6:** MB + água + sulfato de potássio; **TF:** torta de filtro. *, **, *** = significativos pelo teste F, respectivamente, a 5,1 e 0,1%.

Conclusões

De acordo com os resultados obtidos pode-se concluir que:

- A qualidade dos compostos com vinhaça foi, em geral, semelhante ao do composto produzido com água, no entanto a adição do efluente resultou em características estruturais que lhe conferiram, a partir de um certo tempo, maior capacidade de troca catiônica.
- A torta de filtro apresentou maior CTC que os compostos.
- Durante o período de compostagem, para cada quilograma de matéria seca da mistura de resíduos sólidos utilizada na produção dos compostos, foi possível a incorporação de 4,9 L de vinhaça.
- Todos os compostos obtidos apresentaram valores de N, C, pH e relação C/N dentro dos limites fixados pela Instrução Normativa 25, de 23/07/2009, do

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, não apresentando restrição legal para uso agrícola.

- Considerando os índices referenciais $CTC > 600 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$ e $CTC/CO > 1,9 \text{ mmol}_c \text{ g}^{-1}$ a torta de filtro e os compostos que receberam a vinhaça menos diluída (C4 e C5, respectivamente, 75 e 100% de vinhaça) apresentaram maior maturidade que os demais compostos avaliados.
- De uma forma geral, o comportamento de alguns indicadores ao longo do processamento dos resíduos, tais como o teor de cinzas, o índice de mineralização, o teor de carbono, dentre outros, sugerem ainda a instabilidade dos compostos e torta de filtro por ocasião do encerramento do estudo (150 dias).

Referências

ALEF, K.; NANNIPIERI, P. **Methods in applied soil microbiology and biochemistry**. London: Academic Press, 1995.

AVNIMELECH, Y.; BRUNER, M.; EZRONY, I.; SELA, R.; KOCHBA, M. Stability indexes for municipal solid waste compost. **Compost Science and Utilization**, Pennsylvania-PA, v. 4, p. 13–20, 1996.

BERNAL, M. P.; PAREDES, C.; SANCHÉZ-MONEDERO, M. A.; CEGARRA, J.; Maturity and stability parameters of composts prepared with a wide range of organic wastes. **Bioresource Technology**, Inglaterra, v. 63, p. 91-99, 1998.

CARICASOLE, P.; PROVENZANO, M. R.; HATCHER, P. G.; SENESI, N. Evolution of organic matter during composting of different organic wastes assessed by CPMAS ¹³C NMR spectroscopy. **Waste Management**, Bethesda, USA, v. 31, n. 3, p. 411-415, 2010.

CHEFETZ, B.; HATCHER, P. G.; HADAR, Y.; CHEN, Y. Characterization of Dissolved Organic Matter Extracted from Composted Municipal Solid Waste. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, WI, v. 62, p. 326-332, 1998.

DOELSCH, E.; MASION, A.; CAZEVIEILLE, P.; CONDOM, N. Spectroscopic characterization of organic matter of a soil and vinasse mixture during aerobic or anaerobic incubation. **Waste Management**, Bethesda, USA, v. 29, p. 1929–1935, 2009.

DOMEIZEL, M.; KHALIL, A.; PRUDENT, P. UV spectroscopy: a tool for monitoring humification and for proposing an index of the maturity of compost. **Bioresource Technology**, Inglaterra, v. 94, p. 177–184, 2004.

DROZD, J.; JAMROZ, E.; LICZJAR, M.; LICZJAR, S. E.; WEBER, J. Organic matter transformation and humic indices of compost maturity stage during composting of municipal solid wastes. In: MEETING OF THE IHSS, 8., 1997, Wroclaw. **Proceedings**: The role of humic substances in the ecosystems and in environmental protection. Poland, 1997. p. 855–863.

EKLIND, Y.; KIRCHMANN, H. Composting and storage of organic household waste with different litter amendments. II: nitrogen turnover and losses. **Bioresource Technology**, Inglaterra, v. 74, n. 2, p. 125-133, 2000.

ERNANI, P. R.; ALMEIDA, J. A. de; SANTOS, F. C. dos. IX – Potássio. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. **Fertilidade do solo**. Viçosa: SCBS, 2007. p. 551- 594.

FERREIRA, L. F.; AGUIAR, M.; POMPEU, G.; MESSIAS, T. G.; MONTEIRO, R. R. Selection of vinasse degrading microorganisms. **World Journal Of Microbiology and Biotechnology**, Oxford, UK, v. 26, p. 1613–1621, 2010.

FERREIRA, L. F. R. **Biodegradação de vinhaça proveniente do processo industrial da cana por fungos**. 2009. 134 f. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, , Piracicaba, 2009.

GUENET. B.; LELOUP, J. Negative priming effect on mineralization in a soil free of vegetation for 80 years. **European Journal of Soil Science**, Oxford, UK, v. 61, n. 3, p. 384–391, 2010.

HARADA, Y.; INOKO, A. Relationship between cation Exchange capacity and degree of maturity of city refuse composts. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v. 26, n. 3, p. 353-362, 1980.

IANNOTTI, D. A., M. E. GREBUS, B. L. TOTH, L. V. MADDEN, AND H. A. J. HOITINK. Oxygen respirometry to assess stability and maturity of composted municipal solid waste. **Journal of Environmental Quality**, Madison, WI, v. 23, p. 1177-1183, 1994.

IGLESIAS-JIMÉNEZ, E.; PÉREZ-GARCIA, V. Composting of domestic refuse and sewage sludge. II. Evolution of carbon and some “humification” indexes. **Resources, Conservation and Recycling**, Amsterdam, NL, v. 6, p. 243-257, 1992.

INBAR, Y.; CHEN, Y.; HADAR, Y. Solid-state carbon-13 nuclear magnetic resonance and infrared spectroscopy of composted organic matter. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, WI, v. 53, n. 6, p. 1695-1701, 1989.

IVO, W. M. P. M.; ROSSETTO, R. ; SANTIAGO, A. D. ; BARBOSA, G. V. S.; VASCONCELOS, J. N. Impulsionando a produção e a produtividade da cana-de-açúcar no Brasil. In: ALBUQUERQUE, A. C. S.; SILVA A. G. da (Org.). **Desenvolvimento da Agricultura Tropical**. Brasília, DF: Embrapa, v. 1, 2008.

IYENGAR, S. R.; BHAVE, P. P. In-vessel composting of household wastes. **Waste Management**, Bethesda, USA, v. 26, p. 1070–1080, 2006.

JOURAIPHY, A.; AMIR, S.; EL GHAROUS, M.; REVEL, J. C.; HAFIDI, M. Chemical and spectroscopic analysis of organic matter transformation during composting of sewage sludge and green plant waste. **International Biodeterioration & Biodegradation**, Oxford, UK, v. 56, p. 101–108, 2005.

KIEHL, E. J. **Manual de compostagem: maturação e qualidade do composto**. 4. ed. Piracicaba, SP: E. J. Kiehl, 2004. 173 p.

KUZYAKOV, Y.; FRIEDEL, J. K.; STAHR, K. Review of mechanisms and quantification of priming effects. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, UK, v. 32, p. 1485–1498, 2000.

LAX, A.; ROIG, A.; COSTA, F. A method for determining the cation-exchange capacity of organic materials. **Plant and Soil**, Hague, NL, v. 94, p. 349-355, 1986.

LIMA, C. C. de. **Caracterização química de resíduos da produção de biodiesel compostados com adição mineral**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2006. 167 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Programa de Pós Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

MACHADO, K. M. V. **Biodegradação de pentaclorofenol por fungos basidiomicetos lignocelulolíticos em solos contaminados com resíduos industriais**. 1998. 172 f. (Doutorado em Microbiologia Agrícola) - Instituto de Biociências do Campus de Rio Claro, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1998.

MENDONÇA, E. de S.; MATOS, E. de S. **Matéria orgânica do solo: métodos e análises**. Viçosa, MG: UFV, 2005. 107 p.

MILLER, R. H.; KEENEY, D. R. **Methods of soil analysis**. 2. Ed. Madison: Am. Soc. Of Agronomy, 1982.

PAREDES, C.; BERNAL, M. P.; ROIG, A.; CEGARRA, J. Effects of olive mill wastewater addition in composting of agroindustrial and urban wastes. **Biodegradation**, Dordrecht, NL, v. 12, p. 225–234, 2001.

PEREIRA, S. Y. Impactos da aplicação da vinhaça na água subterrânea. In: HAMADA, E. (Ed.). **Água, agricultura e meio ambiente no Estado de São Paulo: avanços e desafios**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2003. cap. II. 1 CD-ROM.

PUGLISI, E.; SPACCINI, R.; PICCOLO, A.; TREVISAN, M.; DEL RE, A. A. M. Conformational Distribution of Dissolved Organic Matter Released from Compost by Repeated Water Extractions. **Compost Science & Utilization**, Pennsylvania, PA, v. 18, n. 2, p. 105-110, 2010.

RIBEIRO, B. T.; LIMA, J. M. de; CURI, N.; OLIVEIRA, G. C. de; LIMA, P. L. T. Cargas superficiais da fração argila de solos influenciadas pela vinhaça e fósforo. **Química Nova**, São Paulo, v. 34, n. 1, 5-10, 2011.

RODELLA, A. A.; ALCARDE, J. C. Avaliação de materiais orgânicos empregados como fertilizantes. **Scientia Agricola**, Piracicaba, SP, v. 51, n. 3, p. 556-562, 1994.

ROIG, A.; LAX, A.; CEGARRA, J.; COSTA, P.; HERNANDEZ, M. T. Cation Exchange Capacity As A Parameter for Measuring the Humification Degree of Manures. **Soil Science**, Baltimore, MD, v. 146, n. 5, p. 311-316, 1988.

SAID-PULLICINO, D.; ERRIQUENS, F. G.; GIGLIOTI, G. Changes in the chemical characteristics of water-extractable organic matter during composting and their

influence on compost stability and maturity. **Bioresource Technology**, v. 98, p. 1822–1831, 2007.

SANCHEZ-MONEDERO, M. A.; ROIG, A.; PAREDES, C.; BERNAL, M. P. Nitrogen transformation during organic waste composting by the Rutgers system and its effects on pH, EC and maturity of the composting mixtures. **Bioresource Technology**, v. 78, p. 301–308, 2001.

SÁNCHEZ-MONEDERO, M. A.; ROIG, A.; CEGARRA, J.; BERNAL, M. P. Relationships between water-soluble carbohydrate and phenol fractions and the humification indices of different organic wastes during composting. **Bioresource Technology**, Inglaterra, v. 70, p. 193–201, 1999.

SILVA, M. A. S.; GRIEBELER, N. P.; BORGES, L. C. Uso de vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 1, p. 108–114, 2007.

SILVA, A. da. **Vinhaça concentrada da cana-de-açúcar**: monitoramento de propriedades químicas do solo e mineralização de nitrogênio. Piracicaba, 2012. 109 f. Tese (Doutorado – Programa de Pós-graduação em Ciências. Área de Concentração: Energia Nuclear na Agricultura e no Ambiente) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo, 2012.

STROM, P. Effect of temperature on bacterial species diversity in thermophilic solid-waste composting. **Applied and Environmental Microbiology**, Washington, DC, v. 50, n. 4, p. 899-905, 1985.

TOMATI, U.; GALLI, E.; PASETTI, L.; VOLTERRA, E. Bioremediation of olive-mill wastewaters by composting. **Waste Management & Research**, Bethesda, USA, v. 13, p. 509–518, 1995.

TOMATI, U.; MADEJON, E.; GALLI, E. Evolution of humic acid molecular weight as an index of compost stability. **Compost Science & Utilization**, Pennsylvania, PA, v. 8, n. 2, p. 108-115, 2000.

ÚNICA. UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR. São Paulo. **Produção de etanol do Brasil**. Disponível em: < <http://www.unica.com.br/dadosCotacao/estatistica/>>. Acesso em: 05/12/2010.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Method 3051a – Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils, and oils.** 1998. 30 p. Revision 1, Feb 2007. Disponível em: <<http://www.epa.gov/epawaste/hazard/testmethods/sw846/pdfs/3051a.pdf>>. Acesso em: 14/01/2011.

VEEKEN, A. H. M.; NIEROP, K.; WILDE, V. de; HAMELERS, H. V. M. Characterisation of NaOH-extracted humic acids during composting of a biowaste. **Bioresource Technology**, Inglaterra, v.72, p. 33-41, 2000.

WU, L.; MA, L. Q.; MARTINEZ, G. A. Comparison of methods for evaluating stability and maturity of biosolids compost. **Journal of Environmental Quality**, Madison, WI, v. 29, p. 424-429, 2000.

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of carbon in soil. *Commun. Soil Science And Plant Analysis*, v. 19, p. 14-67-1476, 1988.

ZBYTNIIEWSKI, R.; BUSZEWSKI, B. Characterization of natural organic matter (NOM) derived from sewage sludge compost. Part 1: chemical and spectroscopic properties. **Bioresource Technology**, Inglaterra, v. 96, p. 471–478, 2005.

Embrapa

Tabuleiros Costeiros

Ministério da
**Agricultura, Pecuária
e Abastecimento**

G O V E R N O F E D E R A L
BRASIL
PAÍS RICO É PAÍS SEM POBREZA