

Comissão 2.4 - Química do solo

ESTOQUES DE CARBONO E QUALIDADE DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO EM ÁREAS CULTIVADAS COM CANA-DE-AÇÚCAR⁽¹⁾

Diana Signor⁽²⁾, Caio Fernandes Zani⁽³⁾, Aline Albertini Paladini⁽⁴⁾, Magnus Dall'Igna Deon⁽²⁾ & Carlos Eduardo Pellegrino Cerri⁽⁵⁾

RESUMO

A cana-de-açúcar é a principal cultura utilizada na produção de etanol biocombustível no Brasil e sua colheita pode ser feita com ou sem queima das folhas, aumentando ou diminuindo a emissão de gases do efeito estufa e a deposição de C no solo. Por meio deste trabalho, avaliou-se o efeito de sistemas de colheita de cana-de-açúcar (com e sem queima da palha, com um, três e seis anos após a última reforma do canavial) sobre os teores e estoques de C no solo, a qualidade física da matéria orgânica e a imobilização de C na biomassa microbiana do solo. As áreas de colheita sem queima apresentaram maior teor de C na camada superficial e maiores estoques de C, independentemente do tempo após a última reforma. Diferenças na qualidade física da matéria orgânica ocorreram principalmente na fração com tamanho entre 53 e 75 μm , na qual a proporção de C foi maior nas áreas sem queima. Na camada de 0-10 cm, o sistema sem queima apresentou maior teor de C microbiano. A colheita sem queima da palha é eficiente em acumular C em formas que possuem alto tempo de residência no solo.

Termos de indexação: aquecimento global, cana crua, fracionamento físico, manejo do solo, matéria orgânica do solo.

⁽¹⁾ Parte da Dissertação de Mestrado do primeiro autor. Recebido para publicação em 27 de fevereiro de 2013 e aprovado em 2 de junho de 2014.

⁽²⁾ Pesquisador(a), Embrapa Semiárido. BR 428, km 152, Zona Rural. Caixa Postal 23. CEP 56302-970 Petrolina (PE). E-mail: diana.signor@embrapa.br, magnus.deon@embrapa.br

⁽³⁾ Doutorando, Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Laboratório de Biogeoquímica Ambiental. Av. Centenário, 303, São Dimas. CEP 13416-000 Piracicaba (SP). E-mail: caiofzani@gmail.com

⁽⁴⁾ Bolsista, Departamento de Ciência do Solo, ESALQ. E-mail: aline_rah@hotmail.com

⁽⁵⁾ Professor, Departamento de Ciência do Solo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo. Av. Pádua Dias, 11. CEP 13418-900 Piracicaba (SP). E-mail: cepcerri@usp.br

SUMMARY: CARBON STOCKS AND QUALITY OF SOIL ORGANIC MATTER IN SUGARCANE FIELDS

Sugarcane is the main crop used in ethanol biofuel production in Brazil and it may be harvested with or without burning, increasing or decreasing greenhouse gases emissions and soil carbon deposition. In this study, we evaluated the effect of the sugarcane harvest system (with and without burning, at one, three, and six years after the last replanting) on C contents and C stocks in the soil, the physical quality of soil organic matter, and C immobilization in soil microbial biomass. The areas harvested without burning showed higher C content in the surface layer and higher C stocks, regardless of the time after the last replanting. Differences in the physical quality of organic matter mainly occurred in the 53 to 75 μm particle size fraction, in which the C ratio was higher in the unburned areas. In the 0-10 cm layer, harvesting without burning was associated with higher microbial C. Harvest without straw burning is effective in accumulating C in forms with long residence time in the soil.

Index terms: global warming, green cane, physical fractionation, soil management, soil organic matter.

INTRODUÇÃO

O Brasil é o principal produtor mundial de cana-de-açúcar, matéria-prima para o etanol. A colheita da cana-de-açúcar, tradicionalmente realizada após a queima das folhas, vem sendo gradativamente substituída pela colheita sem uso do fogo, reduzindo a emissão de gases do efeito estufa (GEE) e garantindo o aumento do estoque de carbono (C) no solo (Feller & Bernoux, 2008). Dessa forma, a contribuição efetiva do setor sucroalcooleiro brasileiro para a redução da concentração de CO_2 atmosférico deve-se à substituição da gasolina pelo etanol, que durante a combustão emite menos GEE que os combustíveis fósseis (Borjesson, 2009), e ao acúmulo de C no solo em razão da adoção da colheita sem queima (Cerri et al., 2007).

Dentre os benefícios do sistema de colheita sem queima, podem ser citados a diminuição dos custos de renovação do canavial, decorrente de sua maior longevidade; a reciclagem e liberação gradual de nutrientes pela decomposição da palha; a eliminação das perdas de nutrientes; e a diminuição da emissão de gases e fuligem originados pela queima da palha (Canellas et al., 2003).

No Brasil, os trabalhos de Canellas et al. (2003), Luca et al. (2008) e Galdos et al. (2009) evidenciaram que a colheita da cana-de-açúcar sem queima da palhada aumenta a quantidade de C no solo. O C armazenado no solo, que em termos globais representa mais de três vezes a quantidade de C presente na atmosfera (Lal, 2008), encontra-se principalmente na forma de compostos orgânicos, englobando resíduos frescos ou em diferentes estádios de decomposição, compostos humificados e materiais carbonizados, associados ou não à fração mineral, bem como uma porção viva, composta por raízes e por micro, meso e macrofauna (Roscoe & Machado, 2002). A porção viva da matéria orgânica varia de 1 a 5 % da matéria orgânica do solo (MOS) e, dessa fração, algo entre 60 e 80 % são microrganismos, responsáveis por quase toda a atividade biológica (Moreira &

Siqueira, 2006) e pelo fluxo e pela rápida ciclagem de nutrientes no solo (Gama-Rodrigues & Gama-Rodrigues, 2008).

Assim, a MOS apresenta-se como um complexo conjunto de materiais orgânicos com diferentes composições, disponibilidade aos microrganismos e função no ambiente (Carter, 2001). Alterações na MOS podem ser medidas por meio de mudanças no teor total de C no solo, em suas frações químicas, físicas ou em combinações dessas (Blair et al., 1997). Contudo, segundo Blair et al. (1997), o uso do teor total de C no solo tem um valor limitado, pois pequenas mudanças são difíceis de serem detectadas em razão dos níveis geralmente elevados de C nas áreas nativas e da variabilidade natural que ocorre nos solos. Dessa forma, as técnicas de fracionamento são ferramentas importantes para tentar reduzir a heterogeneidade da MOS, auxiliando na caracterização e quantificação de seus compartimentos (Roscoe & Machado, 2002). As técnicas de fracionamento físico da MOS podem basear-se na densidade, na granulometria ou em uma combinação de ambos os métodos e permitem a separação de frações relacionadas com a dinâmica no estado natural (Roscoe & Machado, 2002). As frações físicas da MOS possuem diferentes papéis na agregação do solo e respondem de maneira diferenciada a alterações nas práticas de manejo (Tisdall & Oades, 1982). Potes et al. (2012) utilizaram o fracionamento físico da MOS para avaliar o efeito periódico de eventos de queima em áreas de pastagem e de vegetação nativa no sul do Brasil e verificaram que, apesar de os estoques de C no solo serem similares entre as áreas, as diferentes frações físicas da MOS comportaram-se de forma distinta em relação às queimadas, permitindo a diferenciação entre as áreas.

O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência dos sistemas de colheita de cana-de-açúcar (com e sem queima da palha) sobre os teores e estoques de C no solo, sobre a qualidade física da MOS e sobre os teores de C microbiano no solo.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram selecionadas áreas de cana-de-açúcar cultivadas sob os sistemas de colheita com e sem queima da palha, em Iracemápolis, SP. O clima da região é do tipo Cwa (Tropical de altitude), conforme a classificação de Köppen, com temperatura média anual de 22 °C e precipitação pluvial em torno de 1.400 mm anuais. Com base nas informações disponíveis no banco de dados da usina, à qual as áreas pertencem, foram amostradas duas cronosequências: uma colhida com queima e outra colhida sem queima da palha, ambas contendo áreas com um, três e seis anos (uma área de cada idade), após a última reforma do canavial (Quadro 1). Todas as áreas receberam manejo semelhante durante a reforma, com eliminação mecânica da soqueira, subsolagem na linha de plantio e subsolagem cruzada. A adubação de plantio foi feita com aplicação de 390 kg ha⁻¹ do formulado 12-00-36, 20 Mg ha⁻¹ de torta de filtro e 200 m³ ha⁻¹ de vinhaça, sendo os dois últimos provenientes do processamento da cana-de-açúcar da própria usina.

Aproximadamente no centro de cada área, foram abertas nove trincheiras, distribuídas na forma de malha regular, com espaçamento de 50 m entre si. Em cada trincheira, foram coletadas amostras de solo nas profundidades de 0-10, 10-20 e 20-30 cm para a caracterização física (Quadro 2) e para a determinação

dos teores totais de C. Em cinco trincheiras (uma no centro e quatro nas extremidades da malha), também foram coletadas amostras das camadas de 0-10 e 10-20 cm para determinar os teores de C microbiano no solo e para o fracionamento físico da MOS. Com as amostras das profundidades de 0-10, 10-20 e 20-30 cm de cada área, formou-se uma amostra composta (0-30 cm), que foi utilizada para caracterização química do solo (Quadro 1).

As amostras utilizadas na avaliação dos estoques de C foram secas ao ar e uma subamostra de aproximadamente 10 g foi moída em gral de porcelana e passada em peneira com abertura de 100 mesh (0,150 mm). Os teores de C nas amostras foram determinados por combustão seca em analisador elementar (LECO® CN 2000). Os estoques de C (Mg ha⁻¹) em cada camada foram calculados multiplicando-se o teor do elemento na amostra (%), a espessura da camada amostrada (cm) e a densidade de cada camada (kg dm⁻³). Para comparar os estoques entre massas iguais de solo, foram feitas correções pela massa de solo equivalente (Ellert & Bettany, 1995), tomando como referência a densidade do solo na área de seis anos colhida com queima. O ajuste, feito apenas na camada mais profunda de cada área, consistiu em encontrar novo valor de profundidade que represente a mesma massa de solo em todas as áreas e que foi usado para os cálculos dos estoques de C corrigidos. Assim, a profundidade corrigida (Prof. Corr.) (cm) foi obtida por:

Quadro 1. Caracterização química do solo (0-30 cm) e classe de solo em áreas de cronosequências de cana-de-açúcar colhida com e sem queima da palha

Tratamento		pH		Ca	Mg	K	Al	H+Al	SB	T	P	V	Classe de solo
		H ₂ O	CaCl ₂										
		mmol _c kg ⁻¹						mg kg ⁻¹ %					
Com queima	1 ano	5,5	5,4	19,5	10,8	37,1	0,3	37,6	67,4	105,0	36,3	64,2	Latossolo Vermelho
	3 anos	4,8	4,4	14,3	5,1	6,0	3,1	50,8	25,3	76,1	10,4	33,3	Latossolo Vermelho
	6 anos	4,5	3,9	5,1	2,6	1,3	14,6	60,1	8,9	69,0	4,4	12,9	Latossolo Vermelho
Sem queima	1 ano	6,1	5,4	44,1	18,8	131,7	1,7	52,6	194,6	247,2	41,9	78,7	Latossolo Vermelho
	3 anos	5,5	5,1	36,3	17,4	43,7	0,1	40,2	97,5	137,6	58,3	70,8	Latossolo Vermelho-Amarelo
	6 anos	6,3	5,5	46,6	15,1	124,5	1,7	39,3	186,2	225,5	54,2	82,6	Latossolo Vermelho

Quadro 2. Densidade do solo e teor de argila em cronosequências de cana-de-açúcar colhida com e sem queima da palha

Tratamento		Densidade do solo			Teor de argila			
		0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm	
		kg dm ⁻³			g kg ⁻¹			
Com queima	1 ano		1,2	1,2	1,4	666	688	736
	3 anos		1,4	1,5	1,4	430	424	437
	6 anos		1,2	1,3	1,3	320	304	352
Sem queima	1 ano		1,0	0,9	0,9	391	402	517
	3 anos		1,5	1,5	1,5	396	450	467
	6 anos		1,1	1,2	1,2	368	393	328

$$Prof. corr. = \frac{Dens. ref.}{Dens. corr.} \times Prof. ref.$$

O termo “Dens. ref.” é a densidade média ponderada na área de referência (kg dm^{-3}); “Dens. corr.”, a densidade média ponderada na área para a qual a correção está sendo feita (kg dm^{-3}); e “Prof. ref.”, a profundidade na área de referência para a camada equivalente à que está sendo corrigida (cm). A ponderação das densidades é feita em razão da espessura de cada camada de solo considerada.

Como os teores de C são maiores em solos com maiores teores de argila, o uso de cronossequências para avaliar estoques de C no solo necessita que as áreas estudadas tenham teores de argila semelhantes, o que não ocorreu neste estudo (Quadro 2). Portanto, para comparar adequadamente os estoques de C entre os tratamentos também foi feita uma correção pelo teor médio de argila de todas as áreas, conforme Moraes et al. (1996):

Estoque final corrigido =

$$= \frac{\text{Estoque inicial} \times \text{Teor médio de argila em todas as áreas}}{\text{Teor médio de argila na camada corrigida}}$$

Os estoques são dados em Mg ha^{-1} , e os teores de argila, em %.

O fracionamento físico da MOS foi feito de acordo com Christensen (1992). As amostras de solo foram secas ao ar e passadas em peneira com abertura de 2 mm e, no momento da análise, uma porção de 20 g de amostra foi colocada em frasco de vidro e foram adicionados 70 mL de água destilada. Em seguida, a amostra foi submetida à dispersão por 15 min em aparelho ultrassônico (Sonic Vibracell), trabalhando a 70 % de sua potência, que é de 500 W, e fornecendo cerca de 13 J de energia às amostras. A amostra dispersa foi passada em um conjunto de peneiras (75 e 53 μm). A porção retida na peneira de 75 μm contém C na forma de matéria orgânica particulada que não se encontra aprisionada nos agregados do solo, sendo formada por resíduos parcialmente decompostos. A fração com tamanho entre 53 e 75 μm (classe de tamanho areia muito fina) possui C em estágio intermediário de decomposição. Já a fração que não ficou retida na peneira de 53 μm é constituída por material em avançado estágio de decomposição, representa a maior parte do C orgânico do solo e encontra-se na forma de complexos organominerais de tamanho silte e argila. Após a dispersão e separação, o material de cada fração foi seco em estufa a 40 °C, pesado, moído em gral de porcelana e passado em peneira com abertura de 0,150 mm para a determinação do teor de C por meio de combustão (via seca).

As amostras utilizadas na determinação do teor de C microbiano foram coletadas, acondicionadas em sacos plásticos com respiro de papel para permitir as trocas gasosas com a atmosfera e levadas ao laboratório onde foram passadas em peneira de malha 2 mm e tiveram a umidade corrigida para 55 % da capacidade

máxima de retenção de água do solo. O C microbiano extraído pelo método de fumigação-extração (Vance et al., 1987) e o teor de C no extrato foi determinado por oxidação com dicromato de potássio ($66,7 \text{ mmol L}^{-1}$) em meio ácido e por titulação do dicromato remanescente com sulfato ferroso amoniacal ($0,4 \text{ mol L}^{-1}$). Utilizou-se o fator de correção de 0,38 proposto por Vance et al. (1987).

Considerou-se este estudo como observacional, pois apenas uma área de cada idade foi amostrada em cada cronossequência, ou seja, não houve delineamento experimental e as repetições foram feitas dentro de cada área. Por isso, os resultados dos teores de C no solo, estoques de C (após as devidas correções), teores de C nas diferentes frações físicas da MOS e C microbiano foram avaliados por análise descritiva, com base nas médias e nos respectivos intervalos de confiança ($p=0,95$). Todas as análises foram realizadas com o *software* estatístico SAS.

RESULTADOS

Os teores de C no solo variaram de 10,13 a 26,19 g kg^{-1} e foram maiores nas áreas colhidas sem queima (Figura 1). Nas áreas queimadas, não houve efeito de profundidade, enquanto no sistema sem queima a área de seis anos apresentou maior teor de C na camada superficial (Figura 1).

Nos estoques originais, diferenças entre os sistemas de colheita foram evidentes apenas nas áreas de seis anos (Figura 2). Os estoques de C corrigidos pela massa de solo equivalente diferem dos estoques originais apenas na camada de 20-30 cm, uma vez que a correção foi feita apenas nessa camada, e não foram alterados na área com queima de seis anos (área de referência) (Figura 2). Nas áreas com queima de um e de três anos e na área sem queima de três anos, essa correção reduziu os estoques iniciais, porque as densidades do solo foram superiores à da área de referência (Quadro 2).

Após as correções pela massa de solo equivalente e pelo teor médio de argila nas áreas, os estoques de C variaram de 11,2 a 23,2 Mg ha^{-1} nas áreas colhidas com queima e de 19,4 a 33,4 Mg ha^{-1} nas áreas colhidas sem queima da palha. A grande diferença nos estoques em relação à correção anterior foi observada na área com queima de um ano (Figura 2). Como a correção é feita com o valor médio de argila de todas as áreas, que é menor que o teor original de argila nessa área, os estoques de C também foram reduzidos após a correção. Nas áreas com queima, os estoques de C após três e seis anos foram semelhantes e superiores ao estoque da área com um ano até 30 cm de profundidade. Nas áreas sem queima, os estoques foram maiores que nas áreas queimadas, mas o efeito do tempo após a última reforma foi menos evidente.

O efeito do sistema de colheita da cana-de-açúcar sobre a qualidade física da MOS é apresentado na figura 3. As maiores proporções de C ocorreram nos

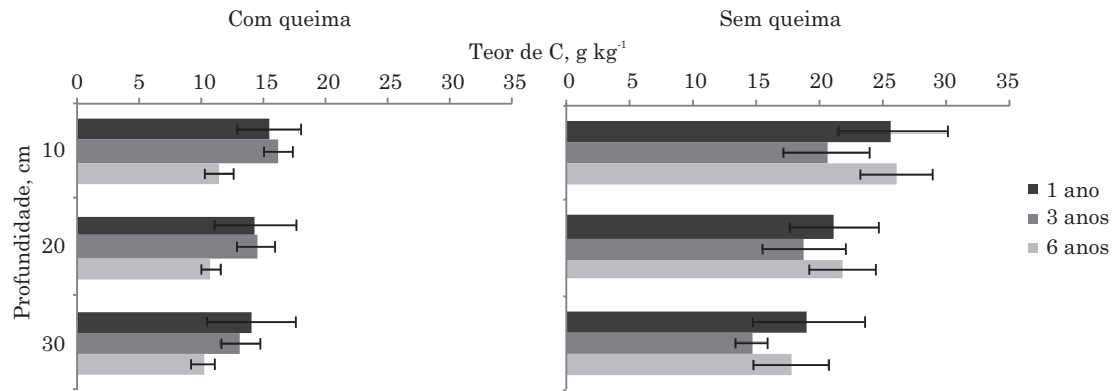


Figura 1. Teores de C no solo em cronossequências de cana-de-açúcar colhida com e sem queima da palha. Barras indicam o intervalo de confiança das médias ($p=0,95$; $n=9$).

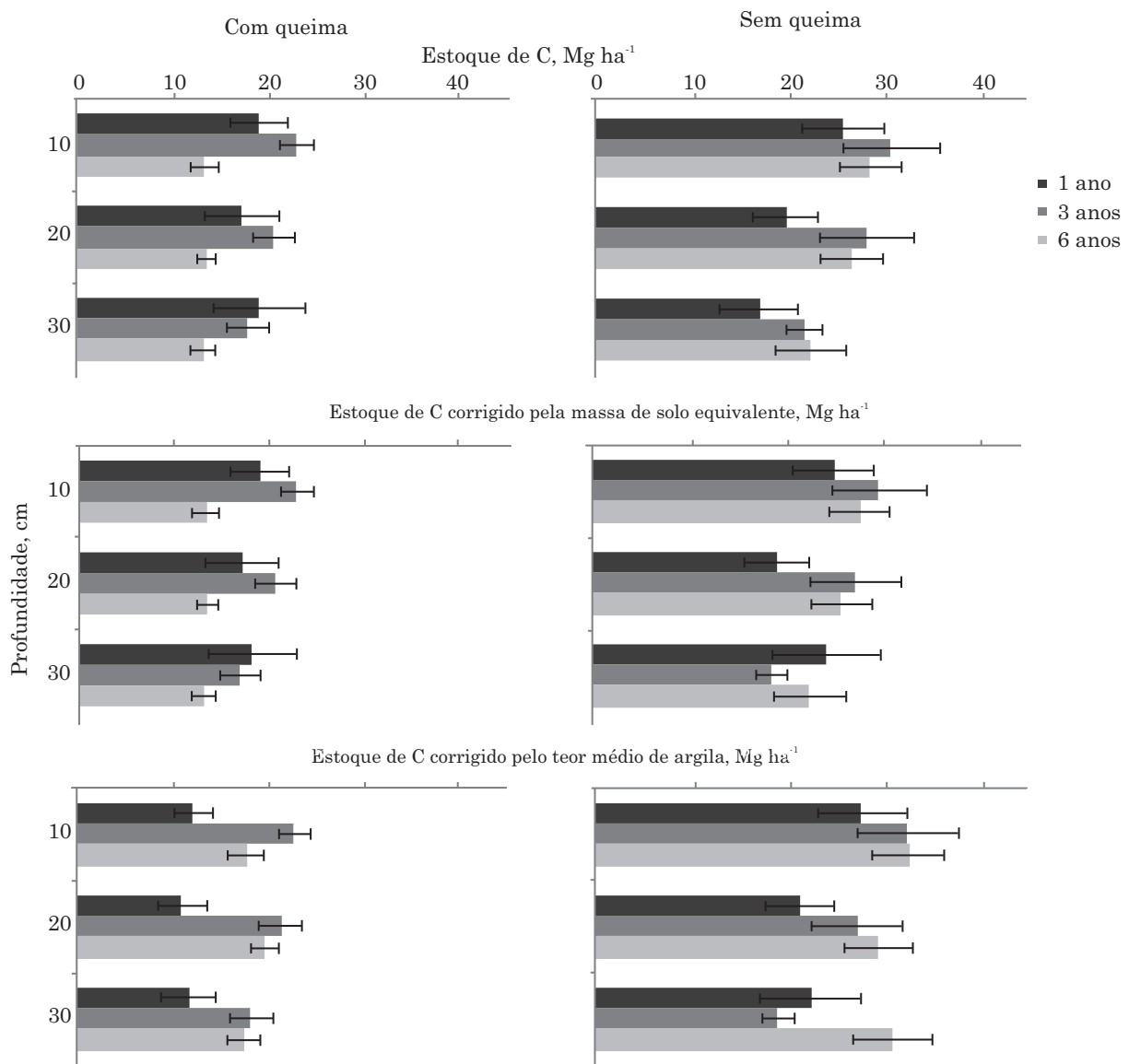


Figura 2. Estoques de C, estoques de C corrigidos pela massa de solo equivalente e estoques de C corrigidos pelo teor médio de argila em cronossequências de cana-de-açúcar colhida com e sem queima da palha. Barras indicam o intervalo de confiança das médias ($p=0,95$; $n=9$).

complexos organominerais de tamanho silte e argila (fração $<53 \mu\text{m}$). A proporção do C total presente na fração orgânica com tamanho entre 75 e $2.000 \mu\text{m}$ aumentou em razão do tempo, independente do sistema de colheita (Figura 3). A grande diferença entre os sistemas de colheita ocorreu na fração organomineral com tamanho entre 53 e $75 \mu\text{m}$, em que as áreas sem queima apresentaram maior quantidade de C que as áreas queimadas.

O teor de C microbiano do solo variou de $198,8$ a $291,7 \text{ mg kg}^{-1}$ de C nas áreas com queima e de $184,2$ a $349,3 \text{ mg kg}^{-1}$ de C nas áreas colhidas sem queima da palha (Figura 4). Nos dois sistemas de colheita, o C microbiano diminuiu com o aumento do tempo após a última reforma de um para três anos e, em seguida, aumentou na comparação entre as áreas com três e seis anos.

DISCUSSÃO

As áreas colhidas sem queima apresentaram os maiores teores de C no solo ($10,13$ a $26,19 \text{ g kg}^{-1}$)

(Figura 1). Em um Latossolo Vermelho em condições similares às de Iracemápolis, Luca et al. (2008) observaram teores de C no solo entre 18 e 23 g kg^{-1} , enquanto Robertson & Thorburn (2007), em trabalho conduzido na Austrália em latitude semelhante à de Iracemápolis, também observaram maior teor de C orgânico nas áreas colhidas sem queima. O sistema de colheita sem uso do fogo promoveu acúmulo de C nas camadas mais próximas à superfície (Figura 1), confirmando as observações feitas por Canellas et al. (2003), Luca et al. (2008) e Galdos et al. (2009).

Nos locais colhidos com queima, os estoques de C foram maiores nas áreas com três e seis anos após a última reforma do canavial. Isso sugere que o simples fato de o solo não ser revolvido anualmente durante o ciclo da cultura aumenta a quantidade de C armazenada no solo, evidenciando que o não revolvimento é importante estratégia de manejo em sistemas onde se faz uso do fogo. Contudo, esse aumento é menor que o proporcionado pela deposição da palha de cana-de-açúcar na superfície em razão da colheita sem queima, que apresentou estoques de C superiores ao sistema com queima da palha (Figura 2). Esses resultados concordaram com as observações feitas por Canellas et al. (2007), Luca et al. (2008) e

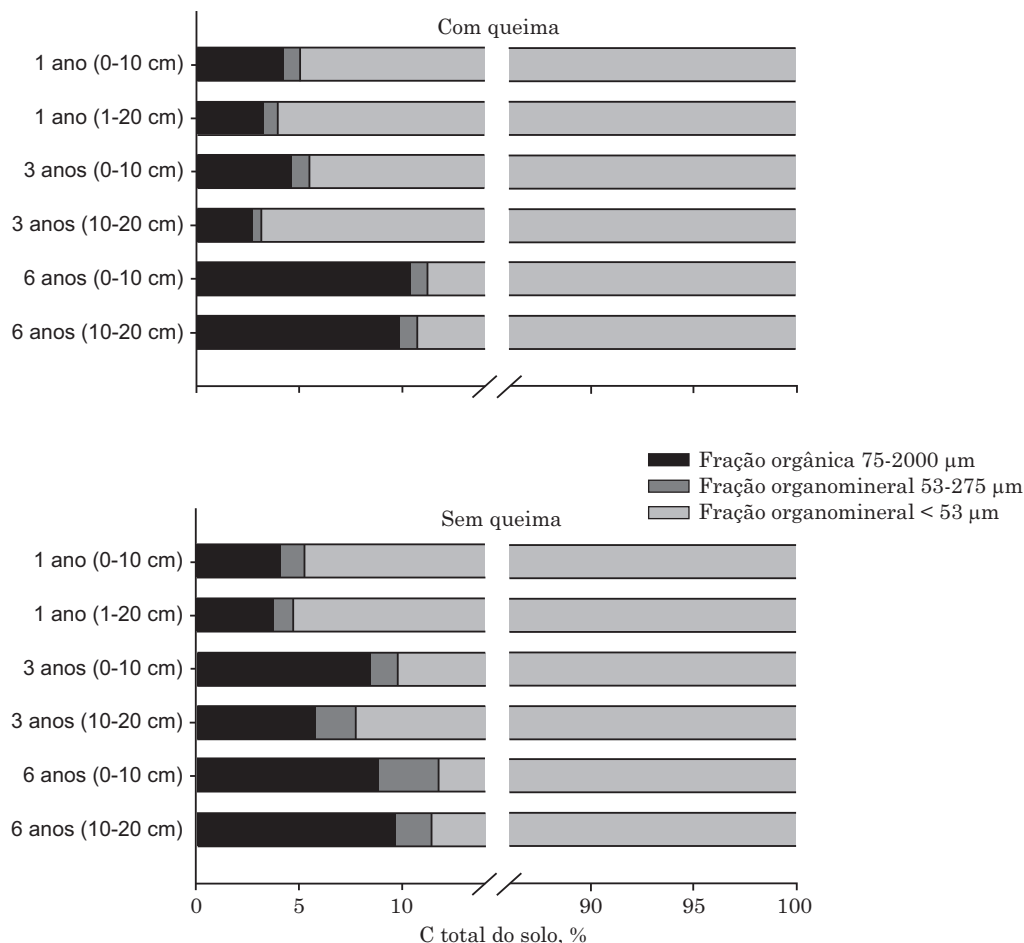


Figura 3. Participação relativa de diferentes frações do solo no teor total de C no solo em cronossequências de cana-de-açúcar colhida com e sem queima da palha ($n=5$).

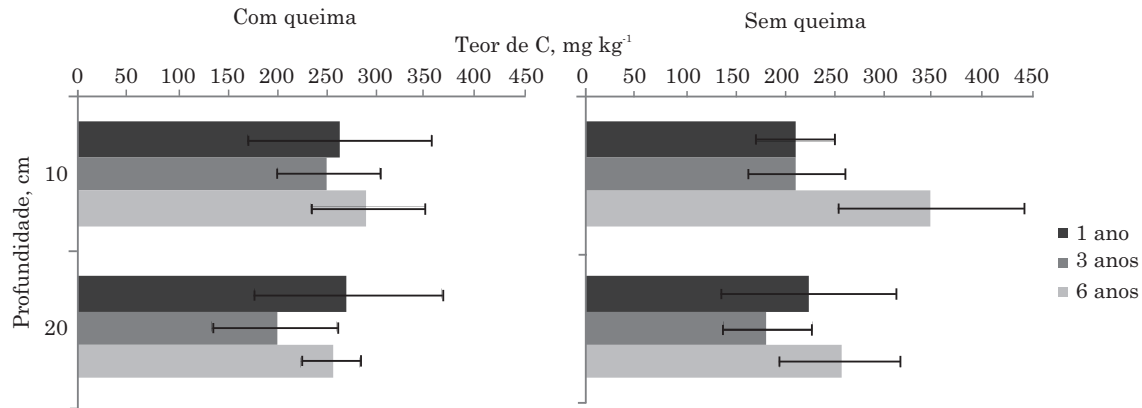


Figura 4. Teor de C microbiano em áreas de cana-de-açúcar em função do tempo, após a última reforma do canavial ($p=0,95$; $n=5$).

Galdos et al. (2009) em outras áreas cultivadas com cana-de-açúcar na região centro-sul do Brasil.

Neste estudo, os estoques de C acumulados até 20 cm foram de $35,6 \pm 3,7 \text{ Mg ha}^{-1}$ e de $57,9 \pm 8,3 \text{ Mg ha}^{-1}$ nas áreas com e sem queima, respectivamente. Luca et al. (2008) apresentaram estoques de C na camada de 0-20 cm equivalentes a $47,9 \text{ Mg ha}^{-1}$, nas áreas de cana-de-açúcar colhidas com queima, e a $54,2 \text{ Mg ha}^{-1}$ nas colhidas sem queima. No trabalho de Galdos et al. (2009), esses valores foram de $27,8$ e $37,6 \text{ Mg ha}^{-1}$, respectivamente. Os resultados deste estudo ficaram mais próximos aos de Canellas et al. (2007), que relataram estoques de C de $59,4 \text{ Mg ha}^{-1}$ em área de cana-de-açúcar colhida sem queima e de $36,1 \text{ Mg ha}^{-1}$ em área queimada.

Segundo Silva-Olaya et al. (2013), em áreas de Latossolo Vermelho cultivadas com cana-de-açúcar e colhidas sem queima, o preparo do solo durante a reforma do canavial promoveu, em apenas 44 dias, a mineralização de aproximadamente 80 % do C acumulado anualmente ao longo do ciclo anterior. Os resultados deste estudo não evidenciaram a perda do teor de C na área sem queima no primeiro ano após a reforma. Contudo, é preciso levar em conta que Silva-Olaya et al. (2013) mediram apenas os efeitos das operações de preparo do solo sobre as perdas de C, enquanto nas áreas de cultivo comercial deste trabalho, além das operações de preparo do solo, também houve aporte de fertilizantes minerais e orgânicos antes do plantio, feitos de acordo com o manejo adotado pela usina, o que pode explicar a ausência de diferença nos estoques de C no solo entre as áreas sem queima com um e seis anos.

Independentemente do sistema de colheita, as maiores proporções de C ocorreram nos complexos organominerais com tamanho inferior a $53 \mu\text{m}$. A fração de menor tamanho concentra a maior parte do C orgânico do solo (Potes et al., 2012), que se encontra em avançado grau de decomposição (Roscoe & Machado, 2002) e possui tempo de residência no solo mais elevado que o C da matéria orgânica particulada

(Lisboa et al., 2009), que neste trabalho corresponde às frações com tamanho entre 53 e $75 \mu\text{m}$ e entre 75 e $2.000 \mu\text{m}$.

A matéria orgânica na forma de raízes de plantas e hifas de fungos é a principal responsável pela estabilização de macroagregados e é muito alterada pelas práticas de manejo, sendo responsável pela alteração no teor total de C no solo (Tisdall & Oades, 1982). As menores proporções de C na fração orgânica com tamanho entre 75 e $2.000 \mu\text{m}$ nas áreas reformadas há apenas um ano sugeriram que o preparo do solo durante a reforma estimulou, principalmente, as perdas de C nessa fração, confirmando as observações de Tisdall & Oades (1982). Com exceção das áreas de três anos, não houve diferença nos teores de C na fração orgânica com tamanho entre 75 e $2.000 \mu\text{m}$ em razão dos sistemas de manejo. Essa similaridade pode ser atribuída à grande quantidade de C na forma de carvão que é depositada anualmente nas áreas queimadas (Graham et al., 2002).

Na fração organomineral com tamanho entre 53 e $75 \mu\text{m}$ foram observadas as maiores diferenças entre os sistemas de colheita, e representa o C em grau intermediário de decomposição (Roscoe & Machado, 2002), ou seja, entre a fração que ainda representa os resíduos recém-depositados sobre o solo (75 a $2.000 \mu\text{m}$) e a fração mais estável, na forma de complexos organominerais ($<53 \mu\text{m}$). A diferença entre os sistemas de colheita mesmo nas áreas com um ano sugere que as perdas de C promovidas pela reforma, conforme relatado por Silva-Olaya et al. (2013), não esgotaram o C armazenado na fração com tamanho de 53 a $75 \mu\text{m}$, pois, mesmo após a reforma, a proporção de C nessa fração ainda foi maior que nas áreas queimadas. O “aprisionamento” de compostos orgânicos no interior dos microagregados, processo que pode ser representado pela fração com tamanho entre 53 e $75 \mu\text{m}$, e a estabilização por reações com a superfície dos minerais (complexação) são importantes mecanismos de manutenção da matéria orgânica no solo (Christensen, 2001).

Na camada de 0-10 cm, o efeito do tempo sobre a imobilização de C microbiano foi mais evidente no sistema sem queima, sugerindo que esse sistema incrementa o teor de C microbiano, confirmando os resultados obtidos por outros autores em áreas cultivadas com cana-de-açúcar (Graham et al., 2002; Graham & Haynes, 2006; Galdos et al., 2009). A adição de resíduos orgânicos ao solo proporciona aumento não linear na biomassa e na atividade microbiana (Stark et al., 2008), enquanto em solos sem adição de resíduos, há redução no teor de C microbiano (Conceição et al., 2005). O efeito do preparo do solo durante a reforma do canavial pode ter propiciado condições favoráveis ao desenvolvimento microbiano em razão do aumento da aeração e da incorporação de resíduos ao solo, minimizando o efeito do tempo após a última reforma e fazendo com que houvesse semelhança entre os teores de C microbiano nas áreas de um e de seis anos (Figura 4). Além disso, o teor de C microbiano é muito influenciado pela umidade do solo. Mendonza et al. (2000) verificaram que, em áreas de cana-de-açúcar colhidas sem queima, o teor de C microbiano foi maior durante o período chuvoso. As amostras de solo utilizadas neste trabalho foram coletadas na mesma época, com divergência de apenas um dia entre os usos e, portanto, as diferenças observadas entre os teores de C microbiano não sofreram influência da umidade do solo no momento da coleta.

CONCLUSÕES

1. O sistema de colheita de cana-de-açúcar sem queima da palha incrementa os teores e os estoques de C no solo, em comparação à colheita com queima.
2. O sistema de colheita sem queima da palha favorece o acúmulo de C ligado a complexos organominerais com tamanho entre 53 e 75 μm .
3. Considerando seis anos como o intervalo de tempo entre duas reformas sucessivas do canavial, nas áreas colhidas sem queima, quanto maior o tempo após a última reforma, maior é a quantidade de C imobilizada na biomassa microbiana do solo na camada mais próxima à superfície.
4. O sistema de colheita de cana-de-açúcar sem queima da palha favorece o acúmulo de C na biomassa microbiana do solo e em complexos organominerais com alto tempo de residência no solo.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pela concessão de bolsa de mestrado ao primeiro autor.

Às equipes do Laboratório de Biogeoquímica Ambiental (CENA - USP) e do Laboratório de Matéria Orgânica do Solo (ESALQ - USP), pelo auxílio nas análises.

LITERATURA CITADA

- BLAIR, G.J.; LEFROY, R.D.B.; SINGH, B.P. & TILL, A.R. Development and use of a carbon management index to monitor changes in soil C pool size and turnover rate. In: CADISCH, G. & GILLER, K.E., eds. *Driven by nature: Plant litter quality and decomposition*. London, CAB International, 1997. p.273-281.
- BORJESSON, P. Good or bad bioethanol from a greenhouse gas perspective - What determines this? *Appl. Energ.*, 86:589-594, 2009.
- CANELLAS, L.P.; VELLOSO, A.C.X.; MARCIANO, C.R.; RAMALHO, J.F.G.P.; RUMJANEK, V.M.; REZENDE, C.E. & SANTOS, G.A. Propriedades químicas de um Cambissolo cultivado com cana-de-açúcar, com preservação do palhico e adição de vinhaça por longo tempo. *R. Bras. Ci. Solo*, 27:935-944, 2003.
- CANELLAS, L.P.; BALDOTTO, M.A.; BUSATO, J.G.; MARCIANO, C.R.; MENEZES, S.C.; SILVA, N.M.; RUMJANEK, V.M.; VELLOSO, A.C.X.; SIMÕES, M.L. & MARTIN-NETO, L. Estoque e qualidade da matéria orgânica de um solo cultivado com cana-de-açúcar por longo tempo. *R. Bras. Ci. Solo*, 31:331-340, 2007.
- CARTER, M.R. Organic matter and sustainability. In: REES, R.M.; BALL, B.C.; CAMPBELL, C.D. & WATSON, C.A., eds. *Sustainable management of soil organic matter*. New York, CABI Publishing, 2001. p.9-22.
- CERRI, C.E.P.; SPAROVEK, G.; BERNOUX, M.; EASTERLING, W.E.; MELILLO, J.M. & CERRI, C.C. Tropical agriculture and global warming: Impacts and mitigation options. *Sci. Agric.*, 64:83-99, 2007.
- CHRISTENSEN, B.T. Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover. *Eur. J. Soil Sci.*, 52:345-353, 2001.
- CHRISTENSEN, B.T. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates. *Adv. Soil Sci.*, 20:1-90, 1992.
- CONCEIÇÃO, P.C.; AMADO, T.J.C.; MIELNICZUK, J. & SPAGNOLLO, E. Soil organic matter and other attributes as indicators to evaluate soil quality in conservation systems. *R. Bras. Ci. Solo*, 29:777-788, 2005.
- ELLERT, B.H. & BETTANY, J.R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. *Can. J. Sci.*, 75:529-538, 1995.
- FELLER, C. & BERNOUX, M. Historical advances in the study of global terrestrial soil organic carbon sequestration. *Waste Manage.*, 28:734-740, 2008.
- GALDOS, M.V.; CERRI, C.C. & CERRI, C.E.P. Soil carbon stocks under burned and unburned sugarcane in Brazil. *Geoderma*, 153:347-352, 2009.

- GAMA-RODRIGUES, E.F. & GAMA-RODRIGUES, A.C. Biomassa microbiana e ciclagem de nutrientes. In: SANTOS, G.A.; SILVA, L.S.; CANELLAS, L.P. & CAMARGO, F.O., eds. Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais. Porto Alegre, Metrópole, 2008. p.159-170.
- GRAHAM, M.H.; HAYNES, R.J. & MEYER, J.H. Soil organic matter content and quality: Effects of fertilizer applications, burning and trash retention on a long-term sugarcane experiment in South Africa. *Soil Biol. Biochem.*, 34:93-102, 2002.
- GRAHAM, M.H. & HAYNES, R.J. Organic matter status and the size, activity and metabolic diversity of the soil microbial community in the row and inter-row of sugarcane under burning and trash retention. *Soil Biol. Biochem.*, 38:21-31, 2006.
- LAL, R. Carbon sequestration. *Philos. Trans. R. Soc. B. Biol. Sci.*, 363:815-830, 2008.
- LISBOA, C.C.; CONANT, R.T.; HADDIX, M.L.; CERRI, C.E.P. & CERRI, C.C. Soil carbon turnover measurement by physical fractionation at a forest-to-pasture chronosequence in the Brazilian Amazon. *Ecosystems*, 12:1212-1221, 2009.
- LUCA, E.F.; FELLER, C.; CERRI, C.C.; BARTHES, B.; CHAPLOT, V.; CAMPOS, D.C. & MANECHINI, C. Evaluation of physical properties and soil carbon and nitrogen stocks as affected by burning or green trash management of sugarcane. *R. Bras. Ci. Solo*, 32:789-800, 2008.
- MENDONZA, H.N.S.; LIMA, E.; ANJOS, L.H.C.; SILVA, L.A.; CEDDIA, M.B. & ANTUNES, M.V.M. Propriedades químicas e biológicas de solo de tabuleiro cultivado com cana-de-açúcar com e sem queima da palhada. *R. Bras. Ci. Solo*, 24:201-207, 2000.
- MORAES, J.F.L.; VOLKOFF, B.; CERRI, C.C. & BERNOUX, M. Soil properties under Amazon forest and changes due to pasture installation in Rondônia, Brazil. *Geoderma*, 70:63-81, 1996.
- MOREIRA, F.M.S. & SIQUEIRA, J.O. *Microbiologia e bioquímica do solo*. Lavras, Universidade Federal de Lavras, 2006. 729p.
- POTES, M.L.; DICK, D.P.; SANTANA, G.S.; TOMAZI, M. & BAYER, C. Soil organic matter in fire-affected pastures and in an Araucaria forest in South-Brazilian Leptosols. *Pesq. Agropec. Bras.*, 47:707-715, 2012.
- ROBERTSON, F.A. & THORBURN, P.J. Management of sugarcane harvest residues: Consequences for soil carbon and nitrogen. *Aust. J. Soil Res.*, 45:13-23, 2007.
- ROSCOE, R. & MACHADO, P.L.O.A. Fracionamento físico do solo em estudos da matéria orgânica. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 2002. 86p.
- SILVA-OLAYA, A.M.; CERRI, C.E.P.; LA SCALA Jr., N.; DIAS, C.T.S. & CERRI, C.C. Carbon dioxide emissions under different soil tillage systems in mechanically harvested sugarcane. *Environ. Res. Lett.*, 8:15-14, 2013.
- STARK, C.H.; CONDRON, L.M.; O'CALLAGHAN, M.; STEWART, A. & DI, H.J. Differences in soil enzyme activities, microbial community structure and short-term nitrogen mineralisation resulting from farm management history and organic matter amendments. *Soil Biol. Biochem.*, 40:1352-1363, 2008.
- TISDALL, J.M. & OADES, J.M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Soil Sci.*, 33:141-163, 1982.
- VANCE, E.D.; BROOKES, P.C. & JENKINSON, D.S. An extraction method for measuring soil microbial biomass-C. *Soil Biol. Biochem.*, 19:703-707, 1987.